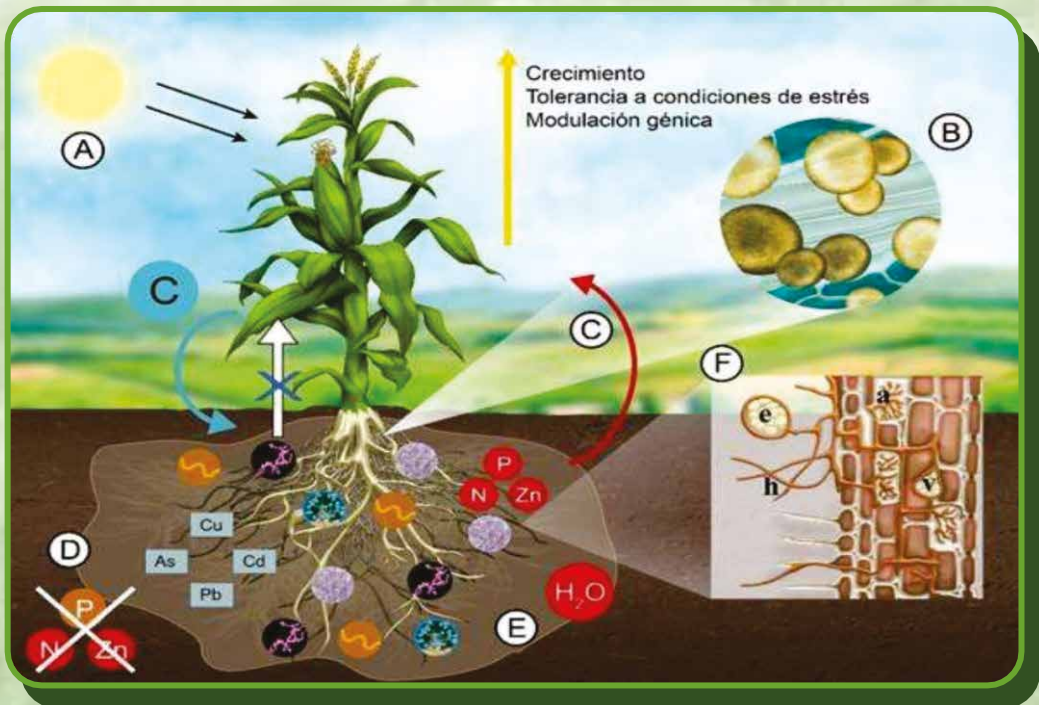


APROVECHAR QUE LAS PLANTAS SE COMUNICAN

Simbiosis: Crear las condiciones necesarias para aprovechar que las plantas gracias a las micorrizas, se comunican entre sí, evitando que la vida se extinga en el planeta



Micorrizas arbusculares y su papel en la nutrición de las plantas. A. Las plantas sintetizan carbono (C) por vía fotosintética, una parte de este es transferido en forma de carbohidratos al hongo a través de las raíces (flecha azul); B. El micelio coloniza la raíz (F), comienza a crecer y aumenta la superficie de absorción de nutrientes de la planta; C. A cambio, el hongo micorrízico arbuscular (HMA) aporta agua y nutrientes como fósforo (P), nitrógeno (N) y zinc (Zn) (flecha roja); D. Los nutrientes pueden estar fuera del alcance de la raíz (elementos tachados); E. Esta asociación en conjunto con el microbioma (p. ej. *Rhizobium* Frank), tiene una función bioacumuladora de metales (cuadros grises) como plomo (Pb), arsénico (As), cobre (Cu) y cadmio (Cd), además de transportar agua; F. Estructuras características de los HMA distinguibles en un corte longitudinal de raíz: espora=e, vesícula=v, arbusculo=a, hifas=h. La asociación con micorrizas arbusculares también puede promover la expresión de algunos genes del HMA involucrados en la mejor adaptación de la micorriza al suelo. Ilustración de: Gustavo Armando Rodríguez Sánchez

Jaime R. Llosa Larrabure



Ingeniero Agrónomo por la Escuela de Agricultura (ENA, 1955-1957). Posee estudios de postgrado y doctorado en la Sorbona de París.

Fue Profesor Asociado en la Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Profesor visitante en la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Nacional de Ingeniería.

Consultor Internacional del PNUD, la FAO y la OIT. Funcionario en el Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura (IICA, 1981-1987).

Cuenta con artículos en varias revistas especializadas y diarios, tanto nacionales, como del extranjero.

La empresa ACADEMIA, la cual registra las veces que un autor de libros o revistas ha sido citado, menciona que fue citado 2,925 veces hasta el 16 de julio del 2025 el presente autor.

Jaime R. Llosa Larrabure

APROVECHAR QUE LAS PLANTAS SE COMUNICAN

**Simbiosis: Crear las condiciones necesarias para aprovechar
que las plantas gracias a las micorrizas, se comunican entre sí,
evitando que la vida se extinga en el planeta**

En las siguientes páginas, les invito a reflexionar respecto a cómo detenemos la irracional explotación de nuestros recursos, renovables y no renovables, en momentos en que la propia naturaleza nos enseña y nos exige un mayor esfuerzo mostrándonos un camino acorde con nuestra condición de seres humanos

“No hay tiempo que perder, hay vida por ganar”

Jorge Zalamea Borda

APROVECHAR QUE LAS PLANTAS SE COMUNICAN

Simbiosis: Crear las condiciones necesarias para aprovechar que las plantas gracias a las micorrizas, se comunican entre sí, evitando que la vida se extinga en el planeta

Autor/Editor

Jaime Roberto Llosa Larrabure

© Jaime Llosa Larrabure, 2025

Calle Las Dalias 359, departamento 203, Miraflores, Lima-Perú

Edición

Primera Edición, agosto del 2025

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú No. 2025-09343

Impresión

RESEP SRL

Av. Salaverry 243 - Urb. Condevilla - SMP - Lima

resepsrl@yahoo.es

Tiraje

300 ejemplares

Este libro podrá ser reproducido, total o parcialmente sin requerirse permiso escrito del autor, tan solo citarlo. Todos los derechos reservados.

He llegado a los 91 años de edad, muchos de ellos vividos con intensidad y, a sabiendas que, mi tiempo de querer ser en el nosotros, se está por acabar, he decidido compartir con ustedes, algunas reflexiones en torno a un tema revelador respecto al comportamiento de las plantas el cual nos enseña e invita a cooperar, a compartir.

*Mi agradecimiento a
mis muy queridos amigos, que son
pocos, quienes hicieron
posible este libro*

ÍNDICE TEMÁTICO

EXORDIO	11
PRÓLOGO. LAS PLANTAS CONVERSAN	17
ANTECEDENTES	19
TEMA 1	
COMUNICACIÓN ENTRE VEGETALES.....	21
Comunicación entre Vegetales. El internet de las plantas	25
Anexo 1 Vídeos sobre la Comunicación de las Plantas	77
Anexo 2 Cómo las Plantas se comunican entre sí	79
Anexo 3 Científicos japoneses captaron en video el momento inédito en la que dos plantas ‘conversan’ para lograr salvarse del peligro	83
TEMA 2	
TEMAS COMPLEMENTARIOS	87
La Alelopatía.....	89
Anexo 1 Vídeo sobre la Alelopatía y la Comunicación de las Plantas.....	101
Plantas de Resurrección.....	103
Anexo 1 Vídeos sobre las Plantas de Resurrección	111
Anexo 2 Recopilación ampliada y actualizada de Estudios Científicos sobre las llamadas Plantas de Resurrección	112
Llareta, Yareta o Azorella	117
Un Hidrogel con cianobacterias podría ser una solución para combatir el cambio climático	125
Las higueras convierten el CO₂ atmosférico en piedra, mediante un proceso natural de mineralización	131
NUESTRAS PROPUESTAS Para operacionalizar las estrategias y acciones de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático	137
REFERENCIAS	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Las plantas y los hongos intercambian ‘mensajes moleculares’	31
Figura 2	Micorrizas arbusculares y su papel en la nutrición de las plantas	39
Figura 3	Los hongos ectomicorrízicos y su papel en la nutrición de las plantas	40
Figura 4	Plasmodesmos en la pared celular primaria	42
Figura 5	Estructura de un plasmodesmo	43
Figura 6	Esquema de producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) para su propagación y uso en campo...	55
Figura 7	Aplicación de las ectomicorrizas con fines de recuperación ecológica	61
Figura 8	El experimento revela a dos especies de plantas que realizan una comunicación química y casi imperceptible.....	83
Figura 9	El experimento registra cómo las plantas realizan procesos químicos para comunicarse ante la amenaza de una oruga	84
Figura 10	Inducción de Aleloquímicos.....	92
Figura 11	Resumen de los conjuntos de datos experimentales de nueva generación disponibles para las especies de resurrección	106
Figura 12	Imagen de Yareta (<i>Azorella compacta</i>).	120
Figura 13	Científicos de ETH Zurich crearon un material vivo que captura y almacena CO ₂ eficazmente	125
Figura 14	El material combina cianobacterias y un hidrogel con polímero.....	127
Figura 15	Higuera en África	133

EXORDIO

No hay tiempo para la indiferencia. Emergencia climática y Derechos Humanos

La Opinión Consultiva de la CIDH

Luego de haber leído y apreciado, no exento de entusiasmo, el notable contenido de la Opinión Consultiva OC-32/2025 sobre Emergencia Climática y Derechos Humanos, adoptada el 29 de mayo de 2025, en respuesta a la consulta realizada por las repúblicas de Chile y Colombia en enero de 2023 y, notificada por la Corte Interamericana de Derechos Humanos (CIDH) mediante Comunicado de Prensa 48/2025 del 3 de julio de 2025, destacamos que esta Opinión Consultiva, constituye un imperativo de conciencia de acción, por aquello que enuncia, denuncia y propone. Siendo así, y habiendo, quien escribe estas líneas, elaborado una propuesta debidamente fundamentada, contenida en su libro: “Simbiosis: Crear las condiciones necesarias para aprovechar que las plantas, gracias a las micorrizas, se comunican entre sí, evitando que la vida se extinga en el planeta”, presento un exordio a la Corte Internacional de Derechos Humanos a través de las propuestas que proponemos en este libro.

De acuerdo con la Corte Interamericana (2025): “Este ha sido el proceso consultivo con mayor participación en la historia del Tribunal”. (párrafo 2).

A continuación, y según la propia CIDH, en su Opinión Consultiva (2025):

La Corte desarrolló **un análisis fáctico y normativo sobre el cambio climático, sus causas, consecuencias y los riesgos que este implica para el ejercicio efectivo de los derechos humanos**. Asimismo, analizó los avances internacionales, regionales y comparados en la materia. (Ítem B. Sobre la estructura de la presente Opinión Consultiva, ítems 30-32) (La negrita es nuestra).

El Tribunal señala que:

Conforme a la mejor ciencia disponible, **la situación actual constituye una emergencia climática que se debe al aumento acelerado de la temperatura global, producto de diversas actividades de origen**

antropogénico, producidas de manera desigual por los Estados de la comunidad internacional, las cuales afectan de manera incremental y amenazan gravemente a la humanidad y, especialmente, a las personas más vulnerables. Esta emergencia climática **solo puede ser atendida adecuadamente a través de acciones urgentes y eficaces** de mitigación, adaptación y avance hacia el desarrollo sostenible, **articuladas, con perspectiva de derechos humanos, y bajo el prisma de la resiliencia...** (Opinión Consultiva OC 32/2025 Emergencia Climática y Derechos Humanos, 2025, VII. Opinión, Opinión 1, página 229) (La negrita es nuestra).

De acuerdo con el comunicado de prensa de la CIDH (2025):

... la Corte determinó el alcance de las obligaciones generales de los Estados en materia de respeto y garantía de los derechos humanos, así como de los deberes de **asegurar el desarrollo progresivo de los derechos económicos, sociales, culturales y ambientales; adoptar disposiciones de derecho interno y cooperar de buena fe** teniendo en cuenta sus responsabilidades diferenciadas frente a las causas del cambio climático, sus capacidades respectivas y sus necesidades particulares **para alcanzar un desarrollo sostenible.** (Comunicado de Prensa 48/2025, Párrafo 6) (La negrita es nuestra).

En la Opinión Consultiva (2025), la Corte:

... **interpretó los derechos** cuyo disfrute es particularmente vulnerable a los impactos de la emergencia climática. Entre ellos, destacó el alcance **del derecho al ambiente sano.** Al respecto, se refirió al **reconocimiento de la Naturaleza y sus componentes como sujetos de derechos, así como a la naturaleza de *jus cogens* de la prohibición de generar daños masivos e irreversibles al ambiente.** La Corte **reconoció la existencia de un derecho humano a un clima sano derivado del derecho a un ambiente sano** y se refirió al contenido del deber correlativo de los Estados de actuar contra las causas del cambio climático, mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, regular y supervisar el comportamiento de los particulares, determinar el impacto climático de los proyectos y actividades que así lo requieran; así como definir y avanzar progresivamente hacia el desarrollo sostenible. (Opinión Consultiva OC 32/2025 Emergencia Climática y Derechos Humanos, 2025, VII. Opinión, Opinión 7-10, páginas 230-231) (La negrita es nuestra).

El tribunal, en su Opinión Consultiva (2025) se refirió:

...a las obligaciones de los Estados en materia de adaptación climática y a los deberes específicos orientados a proteger derechos amenazados por los impactos climáticos como la vida, la salud, la integridad personal, la libertad de residencia y de circulación, el agua, la alimentación, el trabajo y la educación, entre otros. (Opinión Consultiva OC 32/2025 Emergencia Climática y Derechos Humanos, 2025, VII. Opinión, Opinión 11-12, página 231) (La negrita es nuestra).

En su Opinión Consultiva (2025), la Corte resaltó:

...la necesidad de fortalecer el Estado Democrático de Derecho y de garantizar que, en el marco de la emergencia climática, las decisiones sean adoptadas en forma participativa, abierta e inclusiva. En tal sentido, se pronunció sobre el contenido de los derechos a la ciencia y al reconocimiento de los saberes locales, tradicionales e indígenas; al acceso a la información; al acceso a la justicia; a la participación y sobre el deber especial de proteger a las personas defensoras del ambiente. (Opinión Consultiva OC 32/2025 Emergencia Climática y Derechos Humanos, 2025, VII. Opinión, Opinión 13-18, páginas 231-232) (La negrita es nuestra).

En su Opinión Consultiva (2025), el tribunal:

...constató los riesgos extraordinarios generados por el cambio climático para personas y grupos en situaciones de especial vulnerabilidad como las derivadas de factores estructurales e interseccionales y de circunstancias dinámicas y contextuales. Al respecto, se refirió a la obligación de los Estados de **adoptar medidas diferenciales para garantizar la igualdad real en el goce de los derechos en el contexto de la emergencia climática y facilitar procesos de adaptación sostenibles** que promuevan el bienestar de las personas y la resiliencia. (Opinión Consultiva OC 32/2025 Emergencia Climática y Derechos Humanos, 2025, VII. Opinión, Opinión 19-20, página 233) (La negrita es nuestra).

Si bien la Opinión Consultiva de la Comisión Interamericana de Derechos Humanos (CIDH), fue ponderada como aporte de singular importancia, también, fue criticada por carecer de una propuesta destinada a operacionalizar aquello que postula.

Al respecto, la periodista Claudia Aranda (Pressenza, 2025) concluye en su artículo sobre la OC-32/25, lo siguiente:

La Opinión Consultiva OC-32/25 es un documento de enorme valor simbólico, normativo y pedagógico. Sin embargo, desde un enfoque técnico-científico y de gobernanza internacional, su contenido revela **límites estructurales que comprometen su viabilidad real**. No basta con declarar derechos sin cuestionar el marco global que impide su cumplimiento. **El reto no está solo en lo jurídico, sino en lo político, económico y epistemológico**. Lo que está en juego **no es únicamente el reconocimiento de derechos, sino la transformación radical de los sistemas que impiden su realización**. (Conclusión).

La Opinión Consultiva de la Corte Internacional de Justicia (CIJ)

Por otro lado, con fecha 23 de julio de 2025 la CIJ emite su comunicado de Prensa 2025/36 donde notifica sobre la Opinión Consultiva sobre las Obligaciones de los Estados en materia de Cambio Climático, solicitada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en su resolución 77/276 del 29 de marzo de 2023 a través de del Secretario General de las Naciones Unidas, y en donde se plantean las siguientes cuestiones:

- “(a) ¿Cuáles son las obligaciones de los Estados en virtud del derecho internacional para garantizar la protección del sistema climático y otras partes del medio ambiente frente a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero para los Estados y para las generaciones presentes y futuras?
- (b) ¿Cuáles son las consecuencias jurídicas en virtud de estas obligaciones para los Estados cuando, por sus actos y omisiones, han causado un daño significativo al sistema climático y a otras partes del medio ambiente, con respecto a:
 - (i) ¿Estados, incluidos, en particular, los pequeños Estados insulares en desarrollo, que, debido a sus circunstancias geográficas y nivel de desarrollo, resultan perjudicados o especialmente afectados por los efectos adversos del cambio climático o son particularmente vulnerables a ellos? [*sic*]
 - (ii) ¿Pueblos e individuos de las generaciones presentes y futuras afectados por los efectos adversos del cambio climático?”

(Comunicado de Prensa 2025/36, Párrafos 3-6)

Respecto a las obligaciones de los Estados, la CIJ (2025) atiende a esta cuestión señalando:

- Los tratados sobre cambio climático establecen obligaciones vinculantes para los Estados partes a fin de garantizar la protección del sistema climático y otras partes del medio ambiente frente a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero.
- El derecho internacional consuetudinario establece obligaciones para los Estados de garantizar la protección del sistema climático y otras partes del medio ambiente de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero.
- Los Estados parte del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono y en el Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono y su Enmienda de Kigali, el Convenio sobre la Diversidad Biológica y la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación, en particular en África, tienen obligaciones en virtud de estos tratados de garantizar la protección del sistema climático y otras partes del medio ambiente de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero.
- Los Estados parte en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar tienen la obligación de adoptar medidas para proteger y preservar el medio marino, incluso de los efectos adversos del cambio climático, y de cooperar de buena fe.
- Los Estados tienen obligaciones, en virtud del derecho internacional de los derechos humanos, de respetar y garantizar el disfrute efectivo de los derechos humanos adoptando las medidas necesarias para proteger el sistema climático y otras partes del medio ambiente.

Con respecto al tema de las consecuencias jurídicas, el Tribunal (2025) señala que:

- El incumplimiento por parte de un Estado de cualquiera de las obligaciones identificadas en respuesta a la pregunta (a) constituye un hecho internacionalmente ilícito que entraña la responsabilidad de dicho Estado. El Estado responsable tiene el deber continuo de cumplir la obligación incumplida.

Como ciudadano del mundo, habiendo elaborado una propuesta destinada a enfrentar, en alguna medida, la emergencia climática, sus efectos /

consecuencias de mayor relevancia socio económica las cuales afectan la vida, en sus diferentes expresiones, erosionan la biodiversidad, comprometen, seriamente, la seguridad y suficiencia alimentaria, incrementando el hambre y la miseria lo cual afecta la salud de las personas, potencian las situaciones de violencia, abriendo espacios al temor, la desesperanza, la pérdida de humanidad.

Por lo tanto, bajo este marco jurídico, nosotros obrando sin falsa modestia, presentamos, en este libro, una propuesta concreta, viable, como deseable; ello explica la razón del “exordio” que presentamos a la Corte Interamericana de Derechos Humanos (CIDH) y a la Corte Internacional de Justicia (CIJ), en la intención que hagan suya la propuesta general contenida en este libro.

PRÓLOGO

LAS PLANTAS CONVERSAN

“La naturaleza no se apresura, y, sin embargo, todo se logra.”

Johann Wolfgang von Goethe, naturalista y poeta

La historia de la humanidad está marcada por las plantas. Sin embargo, solo recientemente, estamos intentando escuchar lo que ellas nos quieren decir. “Aprovechar que las plantas se comunican” no significa explotarlas, sino abrir los sentidos para comprenderlas, no es sólo una metáfora poética sino hoy en día una verdad que nos remonta a la gran obra de Johann Wolfgang von Goethe: “The Metamorphosis of Plants” (*Die Metamorphose der Pflanzen*, 1790) que trata, de alguna manera, a las plantas como seres sensibles, dinámicas y que se relacionan con su entorno que podría interpretarse como que conversaban con la naturaleza que las rodeaba; bueno, Jaime Llosa retoma el tema de la conversación no sólo con su entorno sino entre ellas, porque como ellas están ancladas a su habitat se ven destinadas a conversar con el paisaje donde les ha tocado vivir y para ello también tienen que conversar entre ellas, se puede decir que en armonía con la casa donde viven, su inmovilidad las lleva armar tejidos de afectos con el espacio que les toca y como no pueden huir conversan con la sabiduría que da el silencio, con los hongos, con las otras especies de plantas, con el suelo, con las lluvias, con la heladas, las granizadas, las sequías, con los insectos, las aves y todos los mamíferos que las rondan y finalmente con el eterno sol, a todos los escuchan, a esto nos lleva este libro que combina la rigurosidad de la biología, con las hermosas metáforas como “las plantas de resurrección” para referirse a las que tienen mecanismos para resistir a las sequías ya sea acumulando agua en sus estructuras o entrando en latencia largos periodos para luego germinar o “resucitar”

Temas como las conversaciones entre las plantas y las micorrizas, en un idioma químico, de nutrientes, de carbono, de ARN en bosques de cooperación armónica a pesar de no tener corazón.

Conversaciones para alertarse entre ellas frente al posible ataque de plagas, herbívoros, aunque a veces con restricciones, procesos combinados con finos procesos alelopáticos

Diálogos que inciden en el modelado de procesos evolutivos de plantas y hongos, en la mejora de la salud de los cultivos reduciendo el uso de agroquímicos, contribuyendo a la restauración de los suelos y ecosistemas.

Son temas, conversaciones, diálogos que nos invitan a conversar respetuosamente con ese universo que tiene sus ritmos, su paciencia y su forma de cuidar la vida.

El libro es parte del movimiento que busca ver la naturaleza de otra manera: dinámica, diversa, interactiva, creativa y no mecanicista y en el que Jaime Llosa nos invoca a seguir el ejemplo de las plantas que es el de cooperar y compartir como la principal forma de salvar a nuestro planeta.

ANTECEDENTES

Este tema ha sido una preocupación recurrente de quien escribe estas líneas; lo cual se comprueba en los abordajes realizados, en los textos contenidos en tres libros que escribiera; uno el año 2014 el otro el 2020 y, el tercero, el año 2023.¹

La información allí contenida hizo posible que ponderara, debidamente, luego de informarme sobre publicaciones científicas, recientes, que abordan el tema de la Comunicación de las plantas, gracias a la simbiosis micorrízica como aprovechar su capacidad de autoorganización (autopoiesis) sumada a acciones de manejo agroecológico del suelo y del ambiente, para evitar que los efectos / consecuencias del Cambio Climático Global, den curso a situaciones de hambre y de violencia, lo cual, abrió camino, motivando que escribiera el libro que ahora presentamos.

Entre los temas abordados, entonces, se encuentran los siguientes:

- Remplazo de los fertilizantes químicos por la biofertilización.
- Control integrado de plagas, con énfasis en control biológico (depredadores naturales), repelentes (Incluye plantas) y trampas con feromonas.
- Inocular micorrizas (Simbiosis) para obtener un mayor desarrollo radicular (mayor superficie de absorción de nutrientes) como hacer disponibles compuestos químicos que no se encuentran disponibles debido a su formulación química; en especial el fosforo.
- Emplear Zeolita como retentor / dispensador de agua de lluvia, para evitar el estrés hídrico debido al incremento de las sequías.

1 Los cuales llevan las siguientes denominaciones. “Cambio Climático Global: una mirada desde nuestro espacio, nuestras esperanzas, nuestras denuncias y propuestas”; “La Pequeña Producción Agrícola en el Perú: contribución para superar, en una formación social capitalista, su condición subordinada al modo de producción dominante”; y, “Sembrando Ideas, Cosechando Proyectos: transitar de una motivación reactiva a una motivación propositiva”.

- Uso de los parientes silvestres de las plantas domesticadas (redomesticación) para recuperar la diversidad genética y mejorar la rusticidad de los cultivos (recuperando la memoria genética).

Ahora, (2025) luego que mis peores temores se están cumpliendo, me propongo, encarar, con mayor precisión, cómo contribuir a disminuir estos impactos.

TEMA 1

COMUNICACIÓN ENTRE VEGETALES

Los avances en las investigaciones sobre comunicación entre los vegetales nos permiten analizar el incremento en su capacidad de adaptación; esto se traduce en una mayor resiliencia ante los efectos / consecuencias del cambio climático global.

La red de comunicación que tienen las plantas se da a través de las, hifas, las cuales equivalen a las raíces de las plantas de los hongos de micorriza arbuscular (HMA). En este texto, mostramos como las diferentes investigaciones en curso, presentan a estos hongos cumpliendo funciones de alerta ante amenazas, incrementando la amplitud radicular de absorción de nutrientes, haciendo posible que se tornen asimilables compuestos químicos que por sus formulaciones no se encuentran disponibles; incluyendo la capacidad de distribuir nutrientes a vegetales en estado de carencia.

Contenido

1. Introducción	25
2. El papel que cumplen las Micorrizas (hongos simbióticos) en la comunicación entre vegetales	26
2.1 ¿Cómo se produce esta simbiosis: hongo-vegetal y qué resultados se obtienen?	26
2.2 Los mensajes moleculares (ARN) para establecer simbiosis	30
2.3 Los avisos de alerta, las advertencias que se comunican las plantas entre sí, frente al ataque de insectos o animales herbívoros, pudiendo inaugurar maneras de control de plagas sin tener que recurrir a pesticidas, sin el empleo de productos químicos	34
2.4 Restricciones biofísicas de las transferencias de señales en redes micorrízicas comunes.....	35
2.5 Consecuencias evolutivas de la señalización a través de redes micorrízicas comunes	35
2.6 Potencial para gestionar redes micorrízicas comunes para ayudar a la protección de cultivos	36
2.7 Conclusiones.....	36
3. Las Micorrizas como herramientas para la restauración ecológica	36
3.1 Tipos de Micorrizas.....	37
4. Para mejor entender, cómo es posible que, en la comunicación entre vegetales, se puedan entregar nutrientes entre las mismas	41
4.1 Morfología	41
4.2 Función.....	43
5. Singular papel que realizan las Micorrizas en la recuperación de suelos degradados como en la eliminación de metales pesados.....	45
6. Aspectos generales del manejo de la simbiosis micorrízica	46
7. Menos agua y fertilizantes con el uso de micorrizas en horticultura	69

8. Los hongos micorrízicos y el “internet de las plantas”	71
8.1 Explicando aquello que se designa como el “internet de las plantas”	72
8.2 Relevancia	74
8.3 Breve recuento de los singulares aportes resultantes de la simbiosis de las plantas micorrizadas	75
8.4 El pésimo estado de situación que muestra la agricultura a nivel del planetario	76

Comunicación entre Vegetales

El internet de las plantas

1. Introducción

Este tema, por su importancia, lo hemos abordado en exposiciones realizadas en universidades, en el Congreso de la República, en libros y artículos; es un tema que comprende los efectos / consecuencias que viene produciendo el Cambio Climático Global - CCG, sobre las personas, los biomas (y dentro de ellos, de los ecosistemas), afectando la vida, en todas sus expresiones; generando incertidumbre, temor, impotencia, pérdida de autoestima.

Transcurridos algunos años, en razón de que este fenómeno global, es acelerado y progresivo, sentí la obligación de encontrar cómo disminuir los impactos más significativos que están ya afectando la salud, la seguridad y suficiencia alimentaria, como la biodiversidad.

Más específicamente, ha sido objeto de mis denuncias y propuestas, contenidas en los tomos I (2023) y II (2024) de mi libro “Sembrando ideas, cosechando proyectos: transitar de una motivación reactiva a una motivación propositiva”.

En el primer tomo, específicamente, abordando los temas: “Simbiosis” (página 378), “Incidencia del CCG en los Andes Tropicales, con énfasis en la ampliación de la frontera agrícola y la afectación de la biodiversidad” (página 135), “Posible extinción de los cultivos andinos debido a los efectos / consecuencias del CCG, ampliación de información” (página 22), “Contaminación por fertilizantes nitrogenados” (página 455). En el segundo tomo, en el tema: “Fertilizantes nitrogenados versus Biofertilización” (Página 110).

Ahora, luego que mis peores temores se están cumpliendo, me propongo, encarar, con mayor precisión, como contribuir a disminuir estos impactos.

2. El papel que cumplen las Micorrizas (hongos simbióticos) en la comunicación entre vegetales

Al respecto, la Dra. Lucy Gilbert del Instituto James Hutton y el Dr. David Johnson de la Universidad de Aberdeen, ambos ubicados en la ciudad de Aberdeen (Escocia) compartieron una publicación en la revista Science Direct, en la cual señalan que:

Los hongos micorrízicos pueden interconectar plantas individuales para formar redes micorrízicas comunes (CMN, por sus siglas en inglés); Trabajos recientes han demostrado que estas redes pueden transportar señales producidas por las plantas en respuesta a la infestación de patógenos a las plantas vecinas (como al accionar de herbívoros) antes de que ellas mismas sean atacadas. La velocidad de transferencia a plantas no infestadas es tal que es probable que el mecanismo tenga beneficios mensurables para la protección de las plantas. En la actualidad, se desconoce la naturaleza de las señales y el grado de control de su transmisión por parte de las plantas y los hongos. La comunicación de señales entre plantas a través de hongos micorrízicos significa que debemos repensar nuestra comprensión de las interacciones multitróficas en la naturaleza, incluyendo los aportes de los hallazgos, los cuales, han llevado a formular varias hipótesis sobre los resultados evolutivos del proceso. Necesitamos urgentemente comprender mejor los mecanismos de transferencia de señales en las comunidades vegetales naturales e intentar aprovechar la formación de CMN como una herramienta para el manejo sustentable de plagas en la agricultura. (Guilbert & Johnson, 2017, Resumen) (La negrita es nuestra).

2.1 ¿Cómo se produce esta simbiosis: hongo-vegetal y que resultados se obtienen?

Según Smith y Read (2008, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1), **“los hongos micorrízicos colonizan las raíces de las plantas terrestres en casi todas las familias”** (la negrita es nuestra).

Gosling, Hodge, Goodlass y Bending (2006, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1) comentan que **“... son omnipresentes en los ecosistemas naturales y agrícolas”** (la negrita es nuestra).

En este marco, Johnson, Leake, Ostle, Ineson y Read (2002, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1) señalan que: **“...se trata de una simbiosis mediante la cual, el hongo obtiene azúcares, fruto de la fotosíntesis con intervención del carbono.”** (La negrita es nuestra).

Por su parte, Smith y Read (2008, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1) añaden que, **“...mientras tanto, el hongo proporciona beneficios a las plantas a través de una mayor adquisición de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, como de agua”** (la negrita es nuestra).

Van Wees, Van der Ent y Pieterse (2008, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1), destacan su **“...mayor resiliencia contra el estrés abiótico”** (la negrita es nuestra), mientras que Maya y Matsubara (2013, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1) destacan su mayor resiliencia contra el estrés **“...abiótico”**.

Selosse, Richard, He y Simard (2006, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1), resaltan que: **“El desarrollo de micelio extrarradical significa que los hongos micorrízicos pueden formar conexiones hifales entre los sistemas de raíces de dos o más plantas hospedantes”** (la negrita es nuestra). Esto, según Helgason, Danieli, Husband, Fitter y Young (1998, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 1) se realiza **“...formando “redes micorrízicas comunes” (CMN) bajo tierra entre múltiples plantas,** conocidas popularmente como “Wood-Wide Web” (la negrita es nuestra).

Heap y Newman (1980, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 2): “proporcionaron evidencia inequívoca en sistemas de pasturas utilizando portaobjetos enterrados, a partir de los cuales, se podían analizar imágenes de conexiones hifales...”

▪ **Categorías de hongos micorrízicos**

Según Taylor (2006, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 2):

Existen tres grandes categorías de hongos micorrízicos [hongos ectomicorrízicos (ECM), hongos micorrízicos

ericoides (ERM) y hongos micorrízicos arbusculares (AM)] [sic] y es probable que difieran en la extensión y función de sus CMN. La mayoría de los hongos ECM (con la excepción del tipo de contacto suave) producen micelio extrarradical y algunas formas de crecimiento de “larga distancia” producen rizomorfos que pueden crecer muchos metros a través del suelo, lo que les da el potencial de conectar muchas raíces. (La negrita es nuestra).

- **Amplitud de la superficie que cubren las hifas de las micorrizas** Leake, et al. (2004, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 2) destacan que en:

La longitud de los micelios extrarradical, las cantidades de hongos AM y ECM varían considerablemente, con estimaciones típicas que van desde 10 a 100 m de hifas g⁻¹ de suelo, o incluso hasta cientos de metros de hifas por metro de longitud de raíz. (La negrita es nuestra).

- **Las hifas pueden conectar a diferentes especies vegetales.** Guilbert & Johnson (2017) señalan que: **“Las CMN pueden conectar no solo plantas de la misma especie, sino también conectar especies diferentes y está claro que las CMN son componentes cruciales de los ecosistemas”.** (Introducción, párrafo 3) (La negrita es nuestra).

Al respecto, Barto, et al. (2011, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 3) comenta que: “Por ejemplo, las CMN promueven ‘zonas bioactivas en red’”; mientras que para Selosse, et al., Song, et, al (2006, citados por Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 3): **“...desempeñan papeles clave en facilitar el transporte y la redistribución de nutrientes entre plantas individuales de la misma especie y de especies diferentes”.** (La negrita es nuestra).

Por su parte, Guilbert & Johnson (2017) señalan que: **“El carbono y los nutrientes minerales pueden moverse a través de las CMN, aunque nuestro conocimiento de los factores que controlan la velocidad, la dirección y la magnitud de estos movimientos es deficiente”.** (Introducción, párrafo 3) (La negrita es nuestra).

Al respecto, Simard, et al. (1997, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 3) menciona que: “En algunos casos, se ha informado de una transferencia neta de carbono entre plantas verdes...”, y Guilbert & Johnson (2017) agregan que: “...las plantas a la sombra parecen ser mayores sumideros de carbono”. (Introducción, párrafo 3).

Al respecto, Robinson y Fitter (1999, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 3) refieren que: **Para las plantas verdes, se ha cuestionado la importancia ecológica de las transferencias netas de carbono** (La negrita es nuestra).

Por otro lado, McKendrick, Leake y Read (2000, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 3) explican que: “...**para las plantas micoheterotróficas aclorofílicas, la transferencia neta de carbono desde las plantas verdes vecinas a través de CMN es inequívoca**”. (La negrita es nuestra); destacando Guilbert & Johnson (2017), su importancia al señalar que es: “...esencial para el crecimiento y la aptitud de las plantas”. (Introducción, párrafo 3).

De acuerdo con Babikova et al. (2013), Babikova et al. (2013b), Song et al. (2014), Song et al. (2015), (todos ellos citados en Guilbert & Johnson, 2017, Introducción, párrafo 4) se tiene que:

Uno de los aspectos más interesantes del funcionamiento de las CMN que ha salido a la luz recientemente, es su papel en el transporte de señales de advertencia entre plantas. Una serie de experimentos ha demostrado que las CMN facilitan las señales que se envían en respuesta al ataque de plagas o patógenos en una planta, que ayudan a las plantas vecinas que están conectadas a través del CMN a la planta atacada a defenderse de los insectos como de los herbívoros. (La negrita es nuestra)

Y según agrega Song, et al. (2010, citado en Guilbert & Johnson, 2017), también “...de los hongos necrotróficos foliares”. (Introducción, párrafo 4).

Guilbert & Johnson (2017), concluyen que: “Este nuevo conocimiento ha abierto la puerta a futuras investigaciones para

comprender los roles ecológicos más amplios de los CMN en la naturaleza”. (Introducción, párrafo 4)

2.2 Los Mensajes moleculares para posibilitar que las plantas acepten establecer simbiosis

Para lograr que las raíces de una planta, acepten ser micorrizadas, estas emplean “Moléculas de ARN fúngico que entran en las células de la raíz para silenciar genes de las plantas”. (CRAG News, 2024, subtítulo).

Los hongos micorrícicos facilitan la simbiosis **enviando a las raíces de otras plantas moléculas de ARN para silenciar genes específicos facilitando la simbiosis.**

Al respecto, encontramos que:

Investigadores del Centro de Investigación en Agrigenómica (CRAG) y la Universidad de Turín han **descubierto que los hongos micorrícicos envían pequeñas moléculas de ARN a las células de las raíces de las plantas para silenciar genes específicos, facilitando así la formación de simbiosis beneficiosas. Este hallazgo, publicado en New Phytologist, abre nuevas vías para mejorar la productividad agrícola y la resiliencia de los cultivos mediante la optimización de estas relaciones simbióticas.**

Puntos Clave

- Las relaciones simbióticas entre plantas y hongos son clave para el intercambio de nutrientes entre ambos y tienen consecuencias beneficiosas para el medio ambiente.
- Un grupo de investigación describe por primera vez que moléculas de ARN de pequeño tamaño de hongos viajan dentro de células de las plantas para inactivar sus genes, promoviendo la simbiosis.
- **Este descubrimiento abre la puerta a posibles aplicaciones en agricultura, como la reducción de fertilizantes, la resistencia a la sequía y a altas temperaturas, o el aumento en la fijación de CO₂.**

(BioChile Noticias, 2024, Párrafo 1-2). (La negrita es nuesta).

Respecto al ARN, se nos explica que:

El ARN o ácido ribonucleico es una molécula similar al ADN que posibilita la síntesis de proteínas. Si bien el ADN contiene la información genética, el ARN es el que permite que esta sea comprendida por las células. Su estructura es de cadena simple, a diferencia del ADN, que tiene una doble cadena. (Sacristán, 2021, ¿Qué es el ARN?)

La figura 1 que consignamos a continuación, ilustra como se produce el proceso de transferencia de ARN:



Figura 1. Las plantas y los hongos intercambian “mensajes moleculares”

Según los investigadores de CRAG y la Universidad de Turín:

Hoy en día, se sabe que **la micorrización no solo mejora la nutrición mineral de las plantas, sino también su capacidad natural para afrontar estreses bióticos y abióticos, así como la capacidad fotosintética y, por lo tanto, la fijación de CO₂.** La mayoría de las plantas terrestres, incluidas muchas especies cultivadas, participan en esta simbiosis tanto en sistemas naturales como agrícolas.

“...La formación de la simbiosis AM² requiere una comunicación molecular estrictamente regulada, que garantiza el reconocimiento mutuo y la cooperación entre ambos organismos. (BioChile Noticias, 2024, Una simbiosis ancestral para retos antiguos y modernos, Párrafo 2-3). (La negrita es nuestra).

Respecto a cómo opera este proceso mencionamos que:

Un paso clave para permitir el establecimiento de la simbiosis AM es que las plantas reconozcan a los hongos beneficiosos como aliados y no activen mecanismos de defensa como si fueran una amenaza. Ese reconocimiento se basa en el diálogo molecular entre ambos organismos. La investigación actual muestra que los sRNAs³ son elementos esenciales en este proceso. Este nuevo estudio demuestra, por primera vez, que los sRNAs del hongo AM *Rhizophagus irregularis* desempeñan un papel crucial en el establecimiento de esta simbiosis. Específicamente, se descubrió que un sRNA fúngico denominado Rir2216⁴ secuestra la maquinaria de interferencia de ARN de la planta *Medicago truncatula* para silenciar su factor de transcripción MtWRKY69, lo que promueve la colonización fúngica. Usando técnicas avanzadas como la micro disección láser, el equipo investigador analizó específicamente las células que contenían arbusculos y encontraron que la expresión de MtWRKY69 estaba reducida en comparación con las células no micorrizadas. Experimentos de biología molecular confirmaron que Rir2216 reduce los niveles de MtWRKY69 y actúa como un elemento clave en la ckRNAi⁵. **“Estos micro mensajes podrían**

2 Simbiosis AM (Micorrizas arbusculares)

3 Los ARN pequeños (sRNA) son moléculas de ARN cortas, generalmente no codificantes, que desempeñan un papel crucial en la regulación de la expresión génica en una amplia variedad de organismos, incluyendo bacterias y eucariotas

4 Rir2216 es un pequeño ARN (sRNA) fúngico que se ha descubierto que juega un papel clave en la regulación de la micorrización, la simbiosis entre hongos y raíces de plantas. Rir2216 actúa como un “mensajero molecular” que la planta *Medicago truncatula* utiliza para silenciar un factor de transcripción llamado MtWRKY69, lo que promueve la colonización fúngica.

5 Se refiere a la interferencia de ARN entre reinos (ckRNAi, del inglés cross-kingdom RNA interference) que se describe como un mecanismo clave en las interacciones planta-patógeno.

ser el ‘esperanto’ entre diferentes organismos, que pueden ser tan diferentes como pertenecientes a diferentes reinos”, señala Ignacio Rubio-Somoza.

Además, los investigadores encontraron que las plantas con mayores niveles de **expresión** de MtWRKY69 mostraron una micorrización reducida, con un menor porcentaje de frecuencia, intensidad y abundancia de arbusculos. Esto indica que la regulación de los niveles de expresión de MtWRKY69 desempeña un papel importante en el control del nivel de colonización fúngica en las raíces micorrícicas, lo que confirma la importancia biológica del hallazgo. (BioChile Noticias, 2024, Silenciamiento genético entre especies, Párrafo 1-5). (La negrita es nuestra).

Respecto a las posibles aplicaciones en agricultura los autores nos comentan que:

El equipo de investigación está estudiando ahora los procesos regulados por MtWRKY69 para determinar su mecanismo de acción. Un análisis filogenético determinó que la secuencia objetivo de MtWRKY69 está conservada evolutivamente, pero específicamente en aquellas especies capaces de formar simbiosis AM. **Los autores especulan que MtWRKY69 podría estar implicado en la respuesta al estrés de la planta y que su reducción podría contribuir a la supresión local de la respuesta inmune, lo que favorecería una colonización más íntima por parte del hongo.**

Mejorar la capacidad simbiótica entre plantas y microorganismos ofrece una solución natural a muchos de los problemas medioambientales a los que nos enfrentamos. Según Ignacio Rubio-Somoza: **“Este conocimiento podría usarse como un ‘Tinder genómico’, que buscaría las mejores parejas de plantas y microorganismos para optimizar la simbiosis y así abordar desafíos agrícolas y ambientales”.** (BioChile Noticias, 2024, Próximos pasos y aplicaciones en agricultura, Párrafo 1-2). (La negrita es nuestra).

Respecto a las ventajas que se obtienen comentan que:

Este descubrimiento abre la puerta a posibles aplicaciones en agricultura, como la reducción de la necesidad de fertilizantes

y agroquímicos al mejorar la absorción natural de nutrientes, o el desarrollo de cultivos con mayor resistencia a factores de estrés ambiental como sequías, fluctuaciones de temperatura, plagas, etc. Además, con cada vez más *[sic]* evidencias de la contribución de las micorrizas a la dinámica del ciclo de carbono global, **la mejora de las simbiosis entre plantas y hongos ofrece un camino sostenible para aumentar la fijación de CO₂ y mitigar la crisis climática.** (BioChile Noticias, 2024, Próximos pasos y aplicaciones en agricultura, Párrafo 3). (La negrita es nuestra).

Respecto a la fijación de CO₂ sugerimos revisar el Anexo 4 donde presentamos una noticia reciente sobre un nuevo material artificial generado con cianobacterias.

2.3 Los avisos de alerta, las advertencias que se comunican las plantas entre sí, frena el ataque de insectos pudiendo inaugurar maneras de control de plagas, sin el empleo de productos químicos

Al respecto Guilbert & Johnson (2017) nos explica:

“...el descubrimiento de estas señales de advertencia basadas en CMN y se analizan las limitaciones y las posibles consecuencias evolutivas y ecológicas. **A continuación, se sugiere cómo se podrían manipular los CMN para ayudar en el control de plagas de los cultivos como parte de la caja de herramientas para promover el manejo integrado de plagas y la agricultura sostenible.** (Introducción, párrafo 5) (La negrita es nuestra)

Luego, Guilbert & Johnson (2017) consideran que: “La idea de que las CMN podrían enviar señales entre plantas se ha desarrollado en los últimos años debido a varias evidencias acumuladas” (Fondo, párrafo 1).

A manera de ejemplo, Finlan y Read (1986, citado por Guilbert & Johnson, 2017, Fondo, párrafo 1) señalan que se conoce: “...**que las CMN pueden transportar nutrientes minerales**”. (La negrita es nuestra). En tanto que, Simard, et al. (1997, citado por Guilbert & Johnson, 2017, Fondo, párrafo 1) agregan que también pueden transportar: “...**otros recursos como el carbono entre plantas**”. (La negrita es nuestra),

En este contexto, Bago, et al. (2002, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Fondo, párrafo 1), plantean que: **“Dado que las hifas de los hongos pueden transferir moléculas grandes como lípidos, aminoácidos y azúcares,** parece razonable preguntarse si también podrían ser capaces...” de un comportamiento similar. (La negrita es nuestra).

2.4 Restricciones biofísicas de las transferencias de señales en redes micorrízicas comunes

Según detallan Guilbert & Johnson (2017):

Si bien el impacto de las señales de advertencia basadas en CMN dependerá de su velocidad y del período de tiempo durante el cual se manifiesten sus efectos, al menos igual de importante es la distancia física que pueden recorrer y la cantidad de plantas receptoras a las que pueden afectar. (Restricciones biofísicas, párrafo 1).

Guilbert & Johnson (2017) nos explican que: “Aún no se han realizado experimentos para probar estos factores” (Restricciones biofísicas, párrafo 1). Pero, Babikova et al., 2013, y Babikova, Johnson, Bruce, Pickett y Gilbert, 2013 (citados por Guilbert & Johnson, 2017, Restricciones biofísicas..., párrafo 1): “...demostraron que las señales pueden viajar a través de CMN de al menos 20 cm de longitud”.

2.5 Consecuencias evolutivas de la señalización a través de redes micorrízicas comunes

Guilbert & Johnson (2017) comentan al respecto que: “Es fácil considerar **los beneficios de la señal basada en CMN para la planta receptora, ya que puede responder induciendo sustancias químicas de defensa,** protegiéndose así contra el ataque inminente de plagas”. (Consecuencias..., párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Suza et al. (2010, citado en Guilbert & Johnson, 2017, Consecuencias evolutivas..., párrafo 1) sostiene que: “...la activación de dichas vías de defensa puede ser costosa para la planta”. En tal sentido, Babikova, Gilbert, Bruce, et al., 2014, Babikova, Gilbert, Randall, et al., 2014 y Guerrieri y Digilio, 2008 (citados en Guilbert & Johnson, 2017,

Consecuencias..., párrafo 1) sostienen que: “la infestación por plagas y enfermedades suele ser extremadamente costosa o incluso fatal”.

2.6 Potencial para gestionar redes micorrízicas comunes para ayudar a la protección de cultivos

Guilbert & Johnson (2017) nos explican que: “Dado que las señales planta-planta basadas en CMN advierten a las plantas antes del ataque de la plaga, puede haber margen para **desarrollar estas señales como parte del conjunto de herramientas en la lucha contra las plagas y enfermedades agrícolas**”. (Potencial para gestionar..., párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Petty (2008) y Weisenburger (1993) (citados en Guilbert & Johnson, 2017, Potencial para gestionar..., párrafo 1), destacaban que: “Si bien los pesticidas han ayudado enormemente a aumentar los rendimientos de los cultivos a lo largo del siglo XX”, sin embargo, según comenta Guilbert & Johnson (2017):

...ahora existe una necesidad creciente de encontrar formas alternativas sostenibles de mantener y mejorar la seguridad alimentaria. De hecho, la UE ha retirado el 80% de las sustancias evaluadas, y más de 100.000 de ellas han sido objeto de un control estricto.

2.7 Conclusiones

Guilbert & Johnson (2017) concluyen que:

La señalización entre plantas a través de las CMN es un proceso descubierto recientemente que tiene amplias implicaciones para la ecología, la evolución y la agricultura sostenible. Es necesario aumentar los tipos de experimentos para considerar sistemas más naturales, incluidos aquellos con conjuntos diversos de plantas, hongos e insectos herbívoros. Además, necesitamos realizar estudios mecanísticos multidisciplinares detallados para identificar la naturaleza de las señales que se transportan a través de las redes neuronales congénitas. (Conclusión, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

3. Las Micorrizas como herramientas para la restauración ecológica

Al respecto, presentamos algunos de los comentarios incluidos en un

documento producido por especialistas mexicanos, con una compilación muy amplia, sobre las Micorrizas. Dado que, en este documento, hacemos solo una exploración reducida, sugerimos, al lector, interesado en profundizar sus conocimientos, que se remita al texto que a continuación glosamos.

Según Carrillo-Saucedo, et al. (2022): “Las asociaciones micorrízicas (AM) son relaciones simbióticas entre las raíces de las plantas y los hongos del suelo”. (Introducción, página 2). En este sentido, Brundrett, et al. (2018) y StrulluDerrien, et al. (2018), (citados en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, página 2) comentan que: “La evidencia muestra que **esta asociación es muy antigua, surge en el Devónico temprano, y fue uno de los factores que permitió que las plantas colonizaran el medio terrestre**”. (La negrita es nuestra). Por lo tanto, según Brundrett (2004) y Ma, et al. (2018) (citados en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, página 2), precisan que: “**Las AM se encuentran en todos los ecosistemas terrestres, desde los polos hasta los desiertos, y se estima que más de 80% de las plantas presentan este tipo de asociación**”. (La negrita es nuestra).

3.1 Tipos de Micorrizas

Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, página 2) nos detallan que: “Por su estructura, **las micorrizas se clasifican en dos grupos principales: endomicorrizas y ectomicorrizas**” (La negrita es nuestra). Brundrett (2004, citado en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, página 2) nos explica que: “**Las endomicorrizas son aquellas donde el micelio penetra tanto intra como intercelularmente en las células corticales de las raíces** (Figura 2F), p. ej., los hongos micorrízicos arbusculares del *Phylum Glomeromycota*” (La negrita es nuestra).

Por su parte, Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, página 2) amplían la explicación señalando que: “**...las ectomicorrizas presentan un micelio que envuelve la raíz y forma un manto** (Figura 3E), p. ej., algunos hongos de los *Phyla Basidiomycota, Ascomycota y Mucoromycota*”. (La negrita es nuestra). Al comentar sobre esta asociación, Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, página 2), destacan

que: **“La función principal de esta asociación simbiótica es el intercambio de nutrientes.** Por un lado, la planta le da al hongo carbono adquirido vía fotosintética y por otro, el hongo ofrece principalmente nitrógeno y fósforo”. (La negrita es nuestra). Por su parte, Chapin, et al. (2010, citado en Carrillo-Saucedo, et al., 2022, Introducción, páginas 2-3), hacen hincapié en que: “Es importante destacar que las plantas asignan entre 5 y 20% del carbono asimilado vía fotosintética, para formar exudados radicales y así mantener a los simbioses de las raíces”. Por su parte, Koide (1991, citado en Carrillo-Saucedo, Introducción, página 3) destaca que: “Para la planta es menos costoso mantener a los simbioses que producir raíces”. Mientras que para Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, Introducción, párrafo 3), se tiene que: **“Además, las plantas micorrizadas presentan ventajas sobre las no micorrizadas en términos del forrajeo de nutrientes en el suelo, la protección contra patógenos y la reducción del estrés ambiental”.** (La negrita es nuestra).

Para Simard (2018, citado en Carrillo-Saucedo, Introducción, página 3):

“Sin embargo, la asociación no es tan simple como parece, ya que el sistema suelo es un ambiente complejo. Por ejemplo, una planta puede formar AM con varios tipos de hongos y un hongo puede hacer simbiosis con muchas plantas, lo que vuelve muy complejas las posibles combinaciones”.

Simard y Durall (2004, citado en Carrillo-Saucedo, Introducción, página 3) comentan que: “Además, se forman redes micorrízicas comunes (Common Mycorrhizal Networks), que son uniones del micelio con distintas plantas”, y que según van der Heijden et al. (1998, citado en Carrillo-Saucedo, 2022, Introducción, página 4): “...influyen en el establecimiento de las plántulas, en la competencia entre plantas y en la diversidad y dinámica de la comunidad vegetal”. Carrillo-Saucedo (2022) nos muestra en las figuras 2 y 3, en páginas siguientes, el papel que cumplen en la nutrición de las plantas (Introducción, páginas 2-3).

A) Micorrizas arbusculares y su papel en la nutrición de las plantas

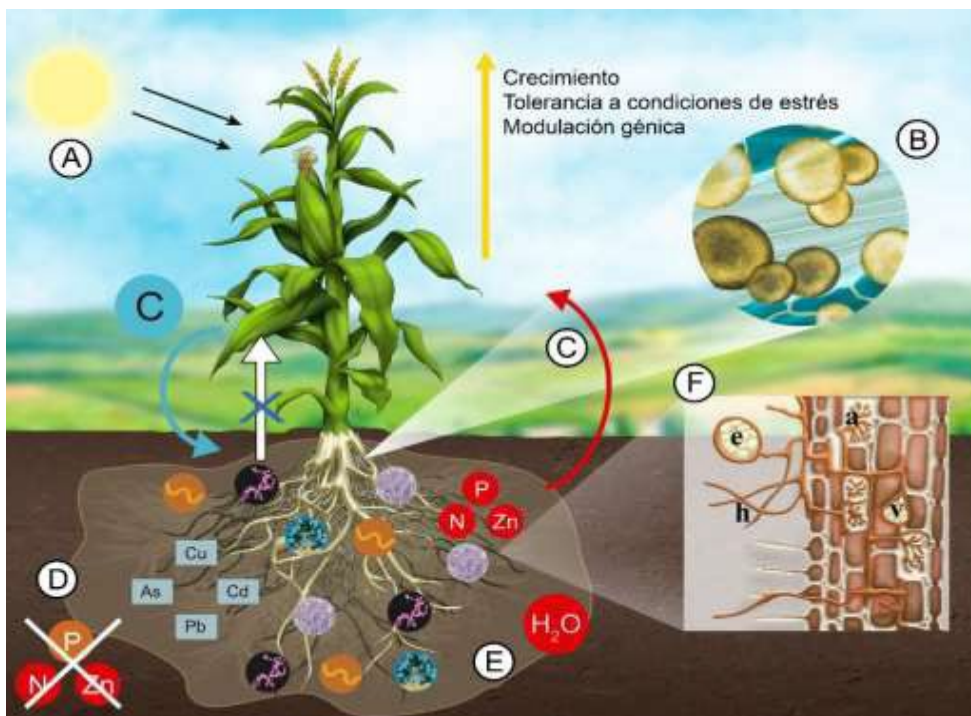


Figura 2. Micorrizas arbusculares y su papel en la nutrición de las plantas. A. Las plantas sintetizan carbono (C) por vía fotosintética, una parte de este es transferido en forma de carbohidratos al hongo a través de las raíces (flecha azul); B. El micelio coloniza la raíz (F), comienza a crecer y aumenta la superficie de absorción de nutrientes de la planta; C. A cambio, el hongo micorrízico arbuscular (HMA) aporta agua y nutrientes como fósforo (P), nitrógeno (N) y zinc (Zn) (flecha roja); D. Los nutrientes pueden estar fuera del alcance de la raíz (elementos tachados); E. Esta asociación en conjunto con el microbioma (p. ej. *Rhizobium Frank*), tiene una función bioacumuladora de metales (cuadros grises) como plomo (Pb), arsénico (As), cobre (Cu) y cadmio (Cd), además de transportar agua; F. Estructuras características de los HMA distinguibles en un corte longitudinal de raíz: espora=e, vesícula=v, arbusculo=a, hifas=h. La asociación con micorrizas arbusculares también puede promover la expresión de algunos genes del HMA involucrados en la mejor adaptación de la micorriza al suelo. Ilustración de Gustavo Armando Rodríguez.

B) Los hongos ectomicorrízicos y su papel en la nutrición de las plantas

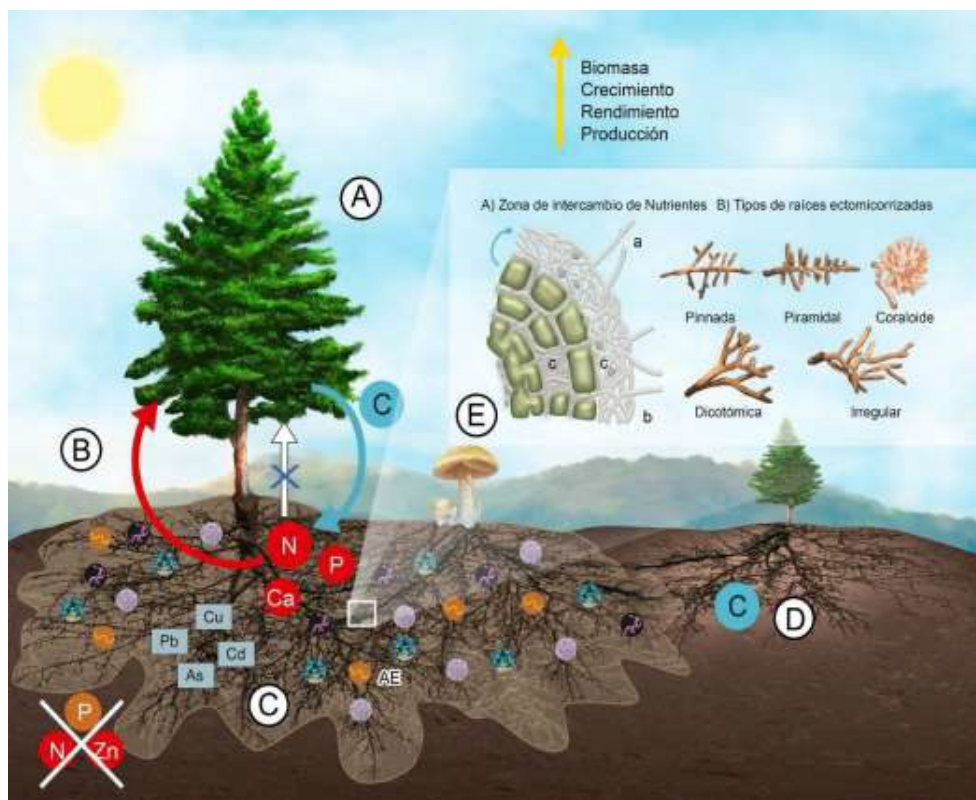


Figura 3. Los hongos ectomicorrízicos y su papel en la nutrición de las plantas. A. Los árboles transfieren carbohidratos (C en círculo azul) producto de la fotosíntesis al hongo ectomicorrízico (HEM) a través de las raíces (flecha azul); B. A cambio el árbol recibe (flecha roja) principalmente fósforo (P) y nitrógeno (N), pero también calcio (Ca), elementos obtenidos a través de “minar” el suelo; C y D. Las plantas micorrizadas, también pueden tener una función bioacumuladora de metales (cuadros grises) como plomo (Pb), arsénico (As), cobre (Cu) y cadmio (Cd), y permitir la transferencia de nutrientes con otras plantas ectomicorrizadas a través de las conexiones miceliarias; E. El intercambio de nutrientes entre la planta y el hongo está mediado por la actividad enzimática (AE) y se realiza en la periferia de la raíz (recuadro E, inciso A) mediante las siguientes estructuras: hifas extrarradicales (a), manto o vaina del micelio (b) y red de Hartig (c). Las raíces al ser colonizadas por HEM presentan variaciones morfológicas (recuadro E, inciso B). La asociación ectomicorrízica también promueve la expresión de genes tanto del hongo como de la planta involucrados en la mejor adaptación de la micorriza al suelo, lo que favorece la producción de esporas de los HEM. Ilustración de Gustavo Armando Rodríguez Sánchez.

4. Para mejor entender cómo es posible que en la comunicación entre vegetales, se puedan entregar nutrientes entre las mismas

Para una mejor explicación, nos apoyamos en las definiciones que aporta el Atlas de histología vegetal y animal, que es una publicación del departamento de biología de la Universidad de Vigo, España.

En ella, se define a los Plasmodesmos como:

...pequeños conductos en las paredes celulares que permiten el paso de moléculas entre citoplasmas de células vegetales vecinas.

Son la principal vía de comunicación entre células próximas, sobre todo en aquellos lugares alejados de los vasos conductores. **El intercambio de sustancias por los plasmodesmos es la forma más común de intercambiar moléculas entre las células vegetales.** De hecho, sólo algunas células muy especializadas, o durante procesos de diferenciación celular, tienen la vía de comunicación por plasmodesmos muy reducida o incluso cortada. (Megías Pacheco, Molist García, & Pombal Diego, 2023, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

4.1 Morfología

Según detallan:

La mayoría de los plasmodesmos son canales rectos (Figura 4), pero los hay más complejos, por ejemplo, algunos ramificados. Tienen un diámetro de unos 30 nm⁶ y una longitud de unos 100 nm. En las plantas terrestres los plasmodesmos tienen dos regiones, la del orificio de entrada y la interna. Además, están formados por tres componentes: una membrana plasmática que tapiza el hueco en la pared celular y se continúa con las membranas plasmáticas de las dos células contiguas, por cisternas de retículo endoplasmático comprimidas (conocidas en conjunto como desmotúbulo) y situadas en el interior de dichos conductos, por fluido citosólico llenando los espacios entre membranas, en el que se han encontrado proteínas del citoesqueleto como la actina y la miosina. La membrana plasmática del plasmodesmo parece tener una composición lipídica diferentes al resto de

6 Nm = Nanometros

la membrana plasmática de las células. Las membranas del desmotúbulo se continúan con las del retículo endoplasmático y están tan comprimidas que prácticamente no hay espacio entre ellas. La calosa suele recubrir la cara de la pared celular en el plasmodesmo a la altura del cuello o reborde en la entrada al plasmodesmo (**Figura 5**).

Los plasmodesmos pueden ser primarios o secundarios. Los primarios se forman durante la división celular y por tanto durante la formación de la pared celular. Los secundarios se forman una vez formada la pared celular. Los plasmodesmos secundarios son normalmente ramificados y las ramas se generan normalmente durante la formación de la pared secundaria. **Son importantes para la conexión de células que pertenecen a linajes diferentes como las vasculares y las parenquimáticas, o las epidérmicas y las parenquimáticas.** (Megías Pacheco, Molist García, & Pombal Diego, 2023, Morfología, párrafos 1 y 2) (La negrita es nuestra y la numeración de figuras se ajusta a los requerimientos de este texto).

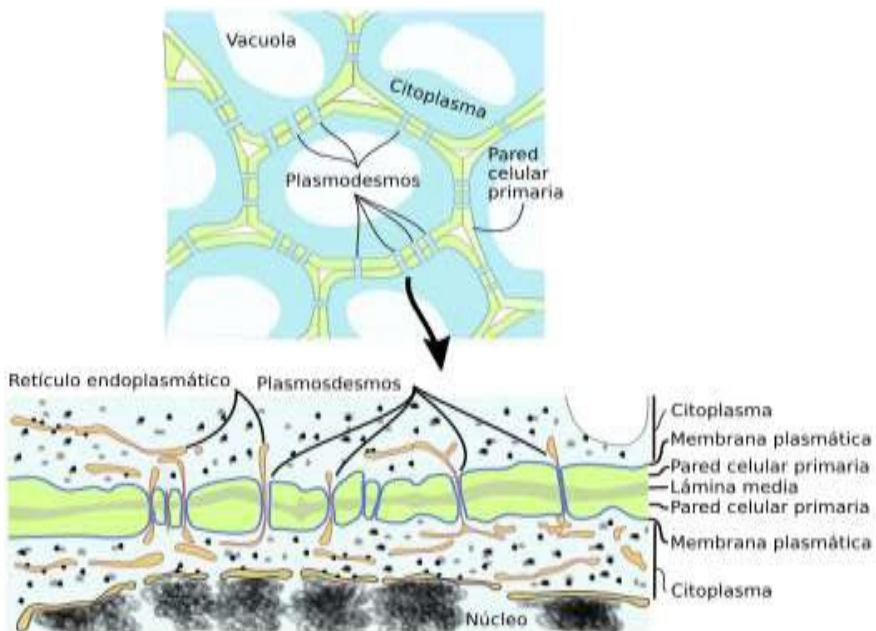


Figura 4. Plasmodesmos en la pared celular primaria. En la parte de abajo se muestra un dibujo de una sección de microscopía electrónica.

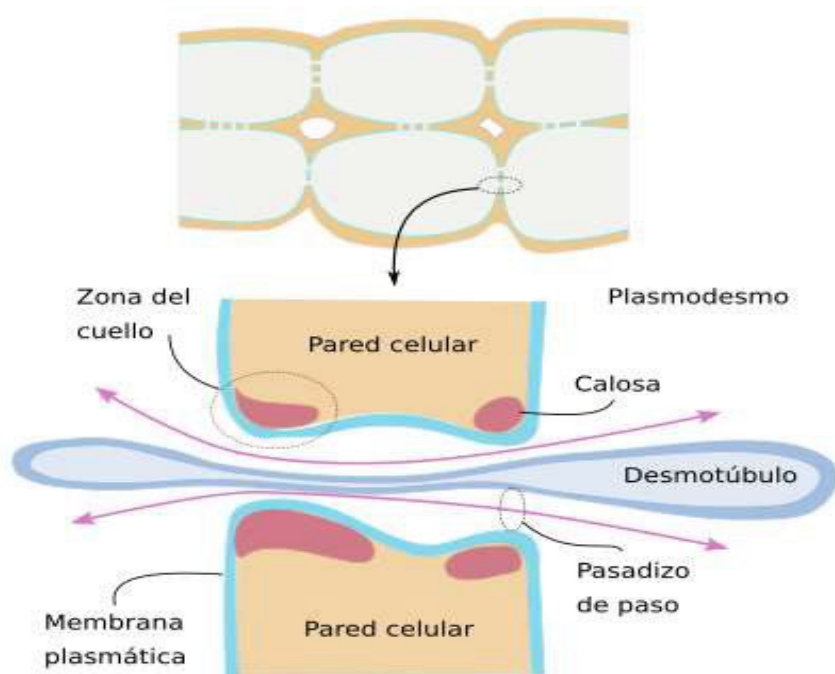


Figura 5. Estructura de un plasmodesmo (modificado de Lee 2015)

4.2 Función

Se destaca el hecho de que los plasmodesmos son:

... esenciales para transportar moléculas entre las células de las plantas y también desde y hacia los haces vasculares. Por ejemplo, moléculas como agua, azúcares, hormonas, proteínas y ARN (ARN mensajeros incluidos) viajan por los plasmodesmos hasta el floema. Las moléculas de tamaño menor o igual a 7 kDa⁷ pueden cruzar libremente el plasmodesmo por difusión. Sin embargo, hay datos de moléculas mucho más grandes, de hasta 10 kDa, que pueden cruzar los plasmodesmos. Incluso que proteínas más grandes podrían cruzarlos cuando son desplegadas por otras proteínas llamadas chaperonas. Las proteínas de los tubos cribosos, que no poseen núcleo ni ribosomas,

⁷ kDa = significa kilodalton, que es una unidad de medida para expresar la masa molecular de una molécula biológica. En otras palabras, indica el peso de una molécula de ARN.

se cree que llegan a cruzando los plasmodesmos desde las células acompañantes. En los embriones parece que todas las células están conectadas por plasmodesmos formando un gran sincitio. Sólo cuando van a establecer linajes celulares de células diferenciadas, dichos linajes desconectan sus plasmodesmos con las células de los otros linajes. Los plasmodesmos son también una vía para la propagación de los virus por la planta.

Este tipo de viaje de citoplasma en citoplasma se denomina vía simplasto. Simplastos refiere a todos los citoplasmas conectados por plasmodesmos. El espacio extracelular se denomina apoplasto **y cuando las moléculas viajan extracelularmente se llama difusión vía apoplasto.** Hay que tener en cuenta que las moléculas no viajan por el interior de las cisternas del retículo endoplasmático que forman el desmotúbulo, sino por el pasaje que queda entre las membranas del retículo endoplasmático y la membrana plasmática. Lo que sí puede ocurrir es que haya transporte de moléculas de membrana mediante movimientos laterales por difusión en las propias membranas.

La conexión entre células por plasmodesmos es tan alta que las moléculas que son propias de unas células y no de otras necesitan mecanismos para ser retenidos en dichas células y no difundir a través de estos poros. Las moléculas que son específicas de ciertas células lo son porque son muy grandes para cruzar por los plasmodesmos o porque son ancladas o incorporadas en estructuras como orgánulos celulares. En realidad, si una célula quiere tener una expresión diferencial de genes respecto a sus vecinas debe reducir enormemente la comunicación por plasmodesmos y en realidad esto ocurre, por ejemplo, durante la morfogénesis, el desarrollo de las flores o la formación de las raíces laterales. En los meristemas se ha propuesto que las líneas celulares se establecen por la posición de las células en el meristemo, por lo que el control de la comunicación entre células en estas estructuras es crucial. Además, el mantenimiento de los gradientes de auxina es necesario para la diferenciación de numerosas estructuras de la planta. Los plasmodesmos participan en el mantenimiento de estos gradientes restringiendo la permeabilidad de esta hormona. La acumulación de

calosa es un mecanismo para disminuir el diámetro útil de difusión del plasmodesmo, y varía según las condiciones fisiológicas. La deposición de calosa es además extremadamente rápida, del orden de minutos. Igual que se sintetiza y deposita en los plasmodesmos, la calosa puede ser eliminada de ellos por enzimas.

Las plantas tienen la capacidad regular el flujo de sustancias a través de los plasmodesmos. Se cree que está mediado por los filamentos de actina localizados en la zona del cuello, por un mecanismo tipo esfínter. También **son capaces de cerrar los plasmodesmos cuando esta circulación entre células pueda ser perjudicial**, por ejemplo, durante una infección o daño del tejido. Un mecanismo inicial es rellenar los huecos de los plasmodesmos con calosa. La calosa se sintetiza en respuesta a proteínas bacterianas o fúngicas.

Actualmente **se considera a los plasmodesmos también como centrales de señalización puesto que diversas proteínas, entre ellas varios tipos de receptores, se concentran en sus membranas, bien plasmática o del desmotúbulo. Algunas de estas proteínas están relacionadas con respuestas de defensa de la planta e influyen en la deposición de calosa y otras con procesos de diferenciación celular.**

Evolutivamente, los plasmodesmos se han inventado de manera independiente por organismos como las algas y las plantas que tienen tejidos parenquimáticos, es decir, con células que se pueden dividir en las tres dimensiones, y con paredes celulares. (Megías Pacheco, Molist García, & Pombal Diego, 2023, Función, párrafos 1 - 6) (La negrita es nuestra).

5. Singular papel que realizan las Micorrizas en la recuperación de suelos degradados como en la eliminación de metales pesados

Según manifiestan Andrade-Torres, et al., 2015 y Oros-Ortega, et al., 2017 (ambos citados en Carrillo-Saucedo, et al., 2022): "...el papel ecológico que juega la simbiosis tiene implicaciones temporales asociadas con la etapa sucesional de un bosque y con el estado de desarrollo de la planta". (Introducción, página 4).

Por otro lado, González-Chávez, et al., (2005, citado en Carrillo-Saucedo, et al.) nos explican que:

En zonas degradadas por el cambio de uso de suelo, las AM juegan un papel importante en la recuperación ecológica. Por ejemplo, se ha demostrado que los hongos micorrízicos participan activamente en la fitoestabilización y en la fitoextracción de metales pesados en suelos de jales mineros. (Introducción, página 4) (La negrita es nuestra).

6. Aspectos generales del manejo de la simbiosis micorrízica

De acuerdo con Carrillo-Saucedo (2022): “El objetivo principal de este trabajo fue revisar aspectos generales del manejo de la simbiosis micorrízica de especies nativas de México con el fin de usarlas como una herramienta potencial para la recuperación de suelos”. (Introducción, página 4).

Advertencia: si bien el texto que sigue se refiere a especies forestales en México, lo valioso de los aportes y en el entendido que lo propuesto puede, *mutatis mutandis*, ser aplicado a otras especies forestales, existente en el Perú, es que lo incluimos en el texto que estamos escribiendo.

En el protocolo del documento de Carrillo-Saucedo (2022) se nos explica lo siguiente:

A) Materiales y Métodos

Se hizo una revisión exhaustiva de 140 artículos sobre asociaciones micorrízicas, publicados entre 1984 y 2019. De esos, 37 presentaron información de trabajos realizados en México con especies nativas, 18 aportaron información referente a los métodos de inoculación más utilizada. Las citas restantes (102), se incluyeron por presentar conceptos ecológicos importantes de la simbiosis micorrízica. La búsqueda incluyó tanto trabajos experimentales como de revisión, los cuales fueron recuperados de las bases de datos bibliográficas SCOPUS (2019), Web of Science (WoS, 2019), Crop Protection Compendium Database (CROP, 2019), Forest Science Database (FSD, 2019), PubMed (2019) y SciELO (2019). Las consultas se hicieron de marzo a mayo de 2019. Para las búsquedas se usaron las palabras clave: “mycorrhizae”, “endo and ectomycorrhizae”, “ectomycorrhizae and *Pinus*”, “ectomycorrhizae and *Quercus*”, “mycorrhizae inoculation”, “ectomycorrhizae and ecological restoration” y “ectomycorrhizae

and Mexico”. También se incluyeron trabajos en español, como protocolos de investigación, empleando las palabras clave: “micorrizas” y “México”. (Materiales y métodos, página 4).

B) Resultados y Discusión

Para cumplir con el objetivo de este manuscrito de revisión, la información revisada fue estructurada en seis apartados:

- 1) se resumen las características generales de las asociaciones micorrízicas, micorrizas arbusculares y ectomicorrizas;
- 2) se plantean los métodos generales de inoculación micorrízica;
- 3) se expone la complejidad simbiótica.

(Resultados y Discusión, página 4).

Respecto a las características de las asociaciones micorrízica, se detalla lo siguiente:

1) Características de las asociaciones micorrízicas

De acuerdo con Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022, Resultados y Discusión, páginas 4-5):

Las asociaciones micorrízicas se clasifican en seis tipos de micorrizas: arbusculares, orquideoides, arbutoides, monotropoides, ericoides y ectomicorrizas. **Las más importantes por su abundancia y distribución en los ecosistemas son las micorrizas arbusculares y las ectomicorrizas. Si bien ambas asociaciones facilitan el uso eficiente de los nutrientes disponibles en el suelo, cada una se especializa en el intercambio de distintos nutrientes, lo que pacta en la conservación del suelo y del ambiente** (ver Tabla 1). (La negrita es nuestra)

Tabla 1 Principales características diferenciales entre micorrizas arbusculares y ectomicorrizas

Características	Micorriza arbuscular	Ectomicorriza
Plantas a las que coloniza	La mayor parte de las plantas (herbáceas, árboles, antoceros y hepáticas, etc.)	Coníferas, angiospermas (arbustos, árboles) y algunas hepáticas
Phyllum de hongos asociados	Glomeromycota	Basidiomycota, Ascomycota y Mucoromycota
Estilo de vida	Biotrofos obligados	Sapótrofos facultativos
Nutrientes que distribuye	Principalmente fósforo	Principalmente nitrógeno
Estructuras de intercambio de nutrientes	Arbúsculos	Red de Hartig
Tamaño	Microscópico	Macroscópico

Nota: Cuadro elaborado a partir de la información tomada de Smith y Read (2010) y Strullu-Derrien et al. (2018) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022, Materiales y métodos, página 5)

Revisemos brevemente las dos asociaciones más importantes:

1.1) Hongos micorrízicos arbusculares

Según Schüßler y Walker (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son organismos microscópicos que pertenecen al *Phylum Glomeromycota*”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5). Shuessler (2021, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), señala que se tienen: “...342 especies descritas”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5). Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), precisan que: “**Los HMA son biotrofos obligados; es decir, requieren de la planta para completar su ciclo de vida y colonizan 80% de las plantas terrestres**”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra).

Carrillo-Saucedo (2022) explica que:

Su ciclo presenta dos fases: la intraradical y la extraradical. La primera comienza cuando el micelio forma un apresorio y penetra las células corticales de las raíces de la planta. Al establecerse la asociación se forman los “arbúsculos” (Figura 2-F, letra a), que son las estructuras características de este grupo. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5).

Además, Giovannetti (2000) y Smith y Read (2010) (citados en CarrilloSaucedo, 2022), explican: "...que, además, se encargan del intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta". (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5). Giovannetti (2000); Bonfante y Genre (2008); y Smith y Read (2010) (citados en Carrillo-Saucedo, 2022), señalan que: "...Otra estructura presente dentro de la raíz son las 'vesículas intrarradicales', las cuales son globulares, de pared gruesa y almacenan aceites (Figura 2F, letra v)". (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5)

Giovannetti (2000, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), explica que: "La fase extraradical ocurre cuando el micelio comienza a salir de la raíz y explora el suelo en búsqueda de nutrientes y agua". (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5). Bagyaraj y Stürmer (2012, citados en Carrillo-Saucedo, 2022), agregan que: "El micelio extraradical es vasto y cenocítico (sin septos), además contiene cientos de núcleos y produce esporas multinucleadas grandes, en promedio de 40 a 600 μm^8 ". (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5). Akiyama et al. (2005, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), detalla que: "Estas esporas presentan paredes gruesas de quitina, son de color hialino a negro y con textura superficial de lisa a altamente ornamentada". (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5). Besserer, et al. (2006, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comenta que: "Su germinación o ramificación hifal requiere de un diálogo químico coordinado, dinámico y complejo entre moléculas producidas por las plantas, como las estrigolactonas que aumentan la posibilidad de la colonización" (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5), mientras que López-Ráez y Pozo (2013, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), agrega que: el diálogo se completa con: "...**la liberación de moléculas metabólicas fúngicas, como el factor MyC que actúa como regulador del crecimiento de la raíz**". (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra).

8 μm = micra, que es la millonésima parte de un metro.

Tanto Smith y Read (2008) como Wang, et al. (2017) (citados en CarrilloSaucedo, 2022), señalan que: **“Los HMA se especializan en proporcionar agua y nutrientes minerales, que no están disponibles en el suelo por su mala difusión, como el fósforo”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra). Mientras que Smith y Read (2010, citado en CarrilloSaucedo, 2022), precisan que: **“La extensión del micelio extraradical a través de las partículas del suelo permite que aumente la superficie absorbente de la raíz hasta 10 veces más”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra).

Carrillo-Saucedo (2022) considera que: **“Debido a su mayor tasa metabólica, los HMA captan, acumulan y controlan el flujo de otros macronutrientes, además del fósforo, como son el nitrógeno, potasio, calcio, y micronutrientes como el zinc, cobre y molibdeno”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra).

Baum, et al. (2015) y Wang, et al. (2017) (citados en Carrillo-Saucedo, 2022), afirman que: **“Estos son movilizados del suelo a la planta hospedera; a cambio de esto, obtienen diversos carbohidratos”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra).

Turk, et al. (2006, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), explica que: **“Este control nutrimental de los HMA ayuda a resolver la deficiencia de estos nutrientes en la planta y participa indirectamente en su tolerancia a factores de estrés abióticos y bióticos (Figura 2)”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 5) (La negrita es nuestra).

Rillig (2004, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), resalta que: **“...los HMA contribuyen a mantener la estabilidad de los agregados, ya que secretan una proteína asociada con la glomalina (Glomalin-related soil protein) que tiene un efecto cementante para las partículas minerales y evita su erosión”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, páginas 5-6). Además, Wang, et al. (2017, citado en Carrillo-Saucedo, 2022, destaca que:

“...esta proteína puede encontrarse a diversas profundidades del perfil edáfico y sus tasas de descomposición son lentas, **lo que contribuye al almacenamiento de carbono orgánico en el suelo**”. (Características de las asociaciones micorrízicas, páginas 6) (La negrita es nuestra).

1.2) Ectomicorizas

Según Brundrett y Tedersoo (2018, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “Los hongos ectomicorrízicos (HEM) son organismos macroscópicos que pertenecen principalmente a los *Phyla Ascomycota*, *Basidiomycota* y, algunos, a *Mucoromycota*”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6). Lindahl y Tunlid (2015, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), sostienen que: “**Los organismos de este grupo, además de ser simbioses son saprótrofos facultativos, ya que oxidan la materia orgánica del suelo para obtener carbono, aunque no de forma tan eficiente como los hongos saprótrofos**”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6) (La negrita es nuestra).

Carrillo-Saucedo (2022) sostiene que: “Los HEM presentan una estructura típica llamada red de Hartig, que transfiere nutrientes entre las células fúngicas y las vegetales (Figura 3-E, letra c) y está conectada a las hifas o agregados hifales”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6).

Carrillo-Saucedo (2022) nos explican que: “El desarrollo adecuado de la asociación micorrízica modifica la morfología de las raíces de las plantas formando los ‘tips’, que son engrosamientos de las puntas de las raíces micorrizadas”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6). Kohler, et al. (2015) y Gehring, et al. (2017) (citados ambos por Carrillo-Saucedo, 2022), manifiestan que: “**Este engrosamiento es regulado por la expresión génica de la planta, que puede facilitar la susceptibilidad de la raíz a ser colonizada**”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6) (La negrita es nuestra).

Courty, et al. (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), sostienen que: “Durante el establecimiento de la asociación micorrízica ocurren cambios que influyen en el éxito de ambos simbios, p. ej., en la actividad metabólica de la planta y en las interacciones competitivas entre dos o más especies de hongos ectomicorrízicos o al asociarse a una planta”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6), o como señala Simard, et al. (1997, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “...con otros simbios”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6).

Carrillo-Saucedo (2022) nos explica que: “A diferencia de los HMA, las hifas de los HEM crecen y no penetran las células corticales y más bien las envuelven”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6). Entonces, según Smith y Read (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “...se forma un manto o vaina de micelio que engrosa las células vegetales (‘tips’), las cuales pueden ser bifurcadas, nodulares o coraloides (Figura 3E, letra b)”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6).

Tanto Agrios (1985); Bonfante y Perotto (1995); como Anderson y Cairney (2007 (citados en Carrillo-Saucedo, 2022), sostienen que:

El manto que se forma alrededor de las puntas de las raíces permite que el micelio se extienda. Al extenderse accede a un mayor volumen de suelo y aumenta considerablemente el área de superficie efectiva para la absorción de nutrientes, en contraste con las raíces desnudas. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6) (La negrita es nuestra).

Rinaldi, et al. (2008, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), sostiene que: La relación biológica entre los HEM y las plantas es muy importante en ecosistemas templados y boreales. El revestimiento de micorrizas es característico de la gran mayoría de los árboles de estas regiones y se estima que entre 10.000 y 60.000 especies de plantas son ectomicorrizadas con 20.000 a 25.000 especies de hongos ectomicorrízicos. (Características de las asociaciones micorrízicas, pág. 6)

Para Corrales, et al. (2018, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “Estas asociaciones se forman con 2% de las coníferas, aunque también pueden darse en las angiospermas”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6). Sin embargo, Policelli, et al. (2020, citado en Carrillo- Saucedo, 2022), sostiene que: “ecológicamente la asociación es importante porque cubre grandes extensiones de bosques templados”. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6).

Finalmente, Read; y Perez-Moreno (2003, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), consideran que: **“Esta simbiosis contribuye a mantener la biodiversidad de microorganismos en los suelos y el correcto mantenimiento de los ecosistemas por la transferencia de agua y nutrientes, principalmente el nitrógeno, hacia los árboles asociados”**. (Características de las asociaciones micorrízicas, página 6) (La negrita es nuestra).

2) Métodos generales de inoculación micorrízica

2.1 Hongos micorrízicos arbusculares

Carrillo-Saucedo (2022) nos explica que:

Los métodos de inoculación de HMA se componen de los siguientes pasos: (Figura 6A-G): A) colecta de esporas y B) propágulos micorrízicos, C) aislamiento e identificación, D) lavado y desinfección de esporas, E) propagación de esporas en laboratorio, F) producción masiva de la fuente de inóculo y, G) inoculación y producción en plantas de viveros. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 6).

Bagyaraj y Stürmer (2012, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos especifica que: “Los detalles de cada paso varían en relación con la especie de hongo y de la planta de interés a inocular”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 6).

a) Métodos de producción de esporas

Por su parte, Smith y Read (2008, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos precisa que: **“Los HMA no producen cuerpos fructíferos y las esporas se producen sobre el micelio en el suelo, o dentro de las raíces (Figura 2A, B)”**.

(Métodos generales de inoculación micorrízica, página 6)
(La negrita es nuestra).

Carrillo-Saucedo (2022) señala que:

El aislamiento del inóculo se realiza a partir de esporas que se extraen directamente de muestras del suelo obtenidas en campo (Figura 2A). Primero, se hace un lavado del suelo y este se pasa a través de tamices con diferente apertura de malla (p. ej., 150, 100 y 35 μm). Lo que se recupera de cada tamiz se lava con agua para quitar las partículas de suelo y se mezcla con una solución de sacarosa al 50%, la cual se agita y se centrifuga. El sobrenadante es transferido a un tamiz más fino (35 μm) y se enjuaga varias veces para retirar el exceso de sacarosa (Figura 2C). (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 6).

Trejo-Aguilar, et al. (2008); y, Bagyaraj y Stürmer (2012) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), agregan que: “Después del enjuague la muestra se pasa a una caja de Petri para observar las esporas al microscopio, posteriormente se separan y se recuperan los morfotipos de interés”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 6).

Carrillo-Saucedo (2022), nos explica que:

Una vez separados los morfotipos, las esporas se desinfectan con métodos establecidos para cada especie de hongo, ya que estos presentan distinta susceptibilidad al proceso (Figura 2D). Por ejemplo, la desinfección de esporas de *Glomus mosseae* T.H. Nicolson & Gerd. (Cepa INCAM 2) y *Glomus* sp. 1 (Cepa INCAM 4) se realiza con una mezcla de cloramina T-cefalexina, que mejora la tasa de germinación de las esporas en soluciones líquidas. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 7).

Fernández, et al. (2005, citado en Carrillo-Saucedo, 2022, nos precisa que: “Este procedimiento se ha utilizado con éxito para la micorrización de la zanahoria”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 7).

Aguilar-Ulloa, et al. (2016, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comenta que:

La propagación de esporas se lleva a cabo utilizando plantas o cultivos trampa (Figura 6E, letra i). Este método consiste en inocular una pequeña cantidad de las esporas aisladas en plantas que propagan rápidamente estos hongos, como las gramíneas y algunas leguminosas. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 7).

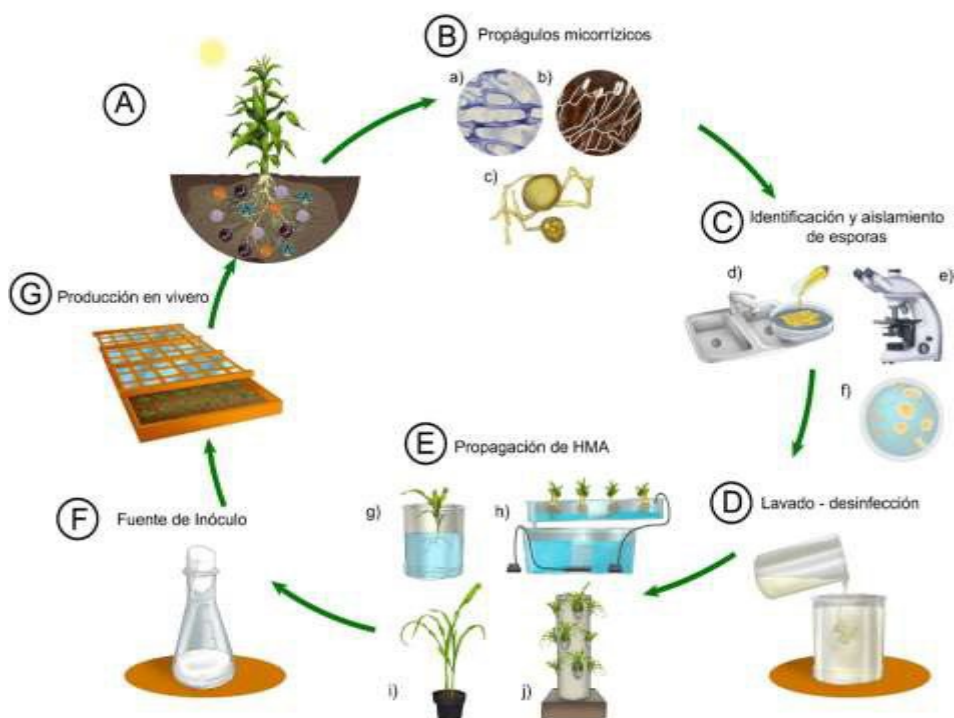


Figura 6. Esquema de producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) para su propagación y uso en campo. A. El inóculo proviene directamente de muestras de suelo traídas de campo; B. Los propágulos micorrízicos son a) raíces colonizadas, b) micelio, c) esporas; C. Las esporas de HMA se identifican y aíslan en tres pasos d) extracción, e) identificación, f) cultivo, y se obtiene la fuente de inóculo (esporas); D. Las esporas se lavan y se desinfectan; E. Una vez lavadas, las esporas son propagadas en diferentes medios que pueden ser g) cultivo en medio acuoso (hidropónico); h) cultivos aeropónicos; i) cultivo trampa, j) cultivos en sustrato sólido; F. El inóculo recuperado, se lleva al vivero para su propagación; G. La propagación se realiza en plantas que son susceptibles a la micorrización o también puede llevarse directamente a campo como una fuente de inóculo adicional en suelos que han sido perturbados. Ilustración de Gustavo Armando Rodríguez Sánchez.

Asimismo, Morton y Redecker (2001, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), muestran que: "...los cultivos trampa pueden llevarse a cabo en diversos sustratos como turba, perlita, vermiculita, arena, arcilla, arcilla calcinada, materiales vegetales o forestales y las mezclas de algunos de ellos". (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 7); Johnston, et al. (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), sugieren que: "...estos cultivos sean limitados en fósforo para favorecer la asociación simbiótica". (Métodos generales de inoculación micorrízica, páginas 7-8).

Según Carrillo-Saucedo (2022): **"Después de tres a seis meses bajo condiciones controladas, se obtiene la colonización de raíces nuevas, lo que favorece el crecimiento del hongo y su multiplicación"**. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

Brundrett, et al. (1996, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), agrega que: "Posteriormente, tras un cambio en las condiciones ambientales se induce la esporulación". (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8). Concluye Carrillo-Saucedo (2022) afirmando que, así: "...se obtiene el suelo o sustrato con esporas, el cual se coloca en bolsas de plástico (Figura 6F)" (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8).

Rincón, et al. (2001, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comentan que: **"El inóculo puede ser utilizado inmediatamente o ser almacenado a 4 °C; sin embargo, se debe considerar que conforme pase el tiempo se reduce la viabilidad de las esporas"**. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

b) Otros métodos de producción de esporas

Carrillo-Saucedo (2022) nos explica que: **"Existen otros métodos más sofisticados de producción de esporas; entre ellos, el de medios hidropónicos y el cultivo aeropónico (Figura 6E, letras g, h)"**. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

Elmes, et al. (1984); y, Fernández-Félix (2003) (citados ambos en Carrillo- Saucedo, 2022), nos explican que, en el primer método:

...se colocan las plantas con sus radículas previamente colonizadas con un hongo micorrízico deseado en una solución nutritiva que se mantiene en aereación continua y manteniendo un pH regulado en el medio para evitar alteraciones ácido/bases causadas por los exudados de la planta. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8).

De acuerdo con Hung y Sylvia (1988); y Sylvia y Jarstfer (1992) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022): **“El cultivo aeropónico, por otro lado, logra un crecimiento masivo y homogéneo de los HMA y evita la presencia de patógenos presentes en el suelo”**. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

Carrillo-Saucedo (2022) nos explica que: “En este método las raíces de una planta, previamente micorrizadas, se colocan en una cámara oscura y son directamente irrigadas a través de un dosificador con una solución nutritiva”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8).

Fernández-Félix (2003, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos precisa que: “Posteriormente, las raíces y propágulos micorrízicos se remueven de la cámara, se cortan segmentos de 1 cm y las esporas se aíslan por tamizado (Figura 6-C), para su posterior uso”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, páginas 8).

Baum, et al. (2015, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comenta que:

A pesar de lo innovador y sofisticado de los métodos anteriores, **la propagación de inóculo a partir de esporas y cultivos trampa** (Figura 6E, letra i) **es el método más empleado, porque es la forma más cercana a la naturaleza biológica del hongo; además requiere menos implementos técnicos**. (Métodos

generales de inoculación micorrízica, páginas 8) (La negrita es nuestra).

Gianinazzi, et al. (1990, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos señala que:

Para evaluar cuál es el método de propagación más adecuado, es importante estimar la densidad de esporas por gramo de inóculo. Este parámetro es importante porque aumenta las posibilidades de la micorrización, lo que se refleja en el crecimiento y desarrollo de la planta micorrizada. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8).

Mientras que Trejo-Aguilar, et al. (2008, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos explica que:

Para evaluar si la micorrización fue exitosa, se mide el porcentaje de colonización a partir de la segunda semana de inoculación. Para esto, se tiñen las raíces (generalmente se utiliza el colorante azul tripano) y se observan al microscopio en busca de hifas, vesículas y arbuscúlos (Figura 2-F, letras a, h, e, v). (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

Por su parte, Haguighi, et al. (2017, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos resalta los resultados positivos, así nos comenta que:

Un ejemplo de la importancia de la densidad de esporas es el que se ha observado en plantas de *Cucumis sativus* L. (pepino) sometidas a estrés salino (75 y 100 μM de NaCl), las cuales fueron inoculadas con diferente densidad de esporas (1×10^3 y 2×10^3). Los resultados mostraron que con el tratamiento de mayor densidad de esporas (2×10^3) aumentaron la biomasa de la raíz y el peso de los frutos, en ambos tratamientos de estrés salino. En cambio, con la menor densidad (1×10^3 esporas) aumentaron la biomasa de las raíces y de la parte aérea, pero no la de los frutos. Estos resultados muestran **el efecto positivo que tiene la inoculación sobre el crecimiento de la planta**

en condiciones de estrés salino, pero el efecto deseado dependerá de la densidad de esporas empleadas. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

Gosling, et al. (2016, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos comenta que:

Además de los inóculos utilizando una sola especie de HMA, se ha evaluado el efecto de inóculos de varios morfotipos de HMA sobre una planta. Por ejemplo, en cultivos de invernadero de cebolla (*Allium cepa* L.) crecidos en suelos deficientes de fósforo, las plantas aumentaron al doble su biomasa aérea cuando se utilizaron alguna de las siguientes especies: *Funneliformis caledonium* (T.H. Nicolson & Gerd.) *C. Walker* & *A. Schüssler*, *F. mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) *C. Walker* & *A. Schüssler*, *Rhizophagus manihotis* (R.H. Howeler, Sieverd. & N.C. Schenck) *C. Walker* & *A. Schüssler*, *R. irregularis* (Błazsk., Wubet, Renker & Buscot) *C. Walker* & *A. Schüssler*, *Paraglomus occultum* (C. Walker) *J.B. Morton* & *D. Redecker*, *Racocetra fulgida* (Koske & C. Walker) *Oehl*, *F.A. Souza* & *Sieverd.* y *Acaulospora spinosa* C. Walker & Trappe, **todas pertenecientes a Glomeraceae**. De las combinaciones inoculadas, la de *Glomeraceae* tuvo mayor impacto en el crecimiento y la absorción de nutrientes en la planta, mientras que la inoculación con *Acaulospora* spp. y *Racocetra* *Oehl*, Souza & Sieverd, no tuvo impacto significativo comparado con los efectos observados en el tratamiento con *Glomeraceae*. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

López-Gómez, et al. (2015, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), concluye señalando que: “Estos resultados sugieren que **el éxito de las inoculaciones se debe a la diversidad funcional del inóculo más que a la de la especie fúngica**”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 8) (La negrita es nuestra).

2.2) Hongos ectomicorrízicos

Agarwal y Sah (2009, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), explican que: “La inoculación con ectomicorrizas en especies forestales como pinos y encinos es de gran importancia para lograr su supervivencia y/o establecimiento de estos últimos en el campo”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Carrera-Nieva y López-Ríos (2004, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), destacan que: “**La simbiosis es importante para incrementar la supervivencia y tasa de crecimiento de especies de interés como se ha visto en *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. y *Pinus patula* Schltdl. & Cham**”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9) (La negrita es nuestra); mientras que López-Gutierrez, et al. (2018, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), refiere al “...*Pinus pringlei* Shaw”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9); y Barragán-Soriano, et al. (2018) y Rodríguez-Gutierrez, et al. (2019) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), refieren al: “...*Pinus montezumae* Gordon & Glend”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Arteaga-León, et al. (2018, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), refieren que:

La micorrización se realiza en los viveros durante la producción de la planta. A pesar de que en México existe escasa información documentada sobre métodos de obtención y aplicación de inóculos para obtener HEM en vivero, se ha logrado la inoculación de diferentes especies vegetales con ectomicorrizas a partir de distintos métodos. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Carrillo-Saucedo (2022) nos explica que:

En general, **la inoculación con HEM se realiza mediante esporas o micelios obtenidos de los cuerpos fructíferos o de muestras de suelo recolectadas en el campo con la ectomicorriza de interés** (Figura 7 - A, B). Una vez que se identifica el HEM se cultiva en el laboratorio. La inoculación se realiza a partir de un cultivo previo en

monocepa o multicepa de esporas, los cuales utilizan una planta susceptible a la ectomicorrización. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9) (La negrita es nuestra).

Cerrato y Alarcón (2001, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), al respecto, señala que: “Este cultivo de esporas presenta un balance adecuado de nitrógeno y fósforo, y se deja crecer hasta que el hongo produce esporas; de ahí se inocula a la planta de interés”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

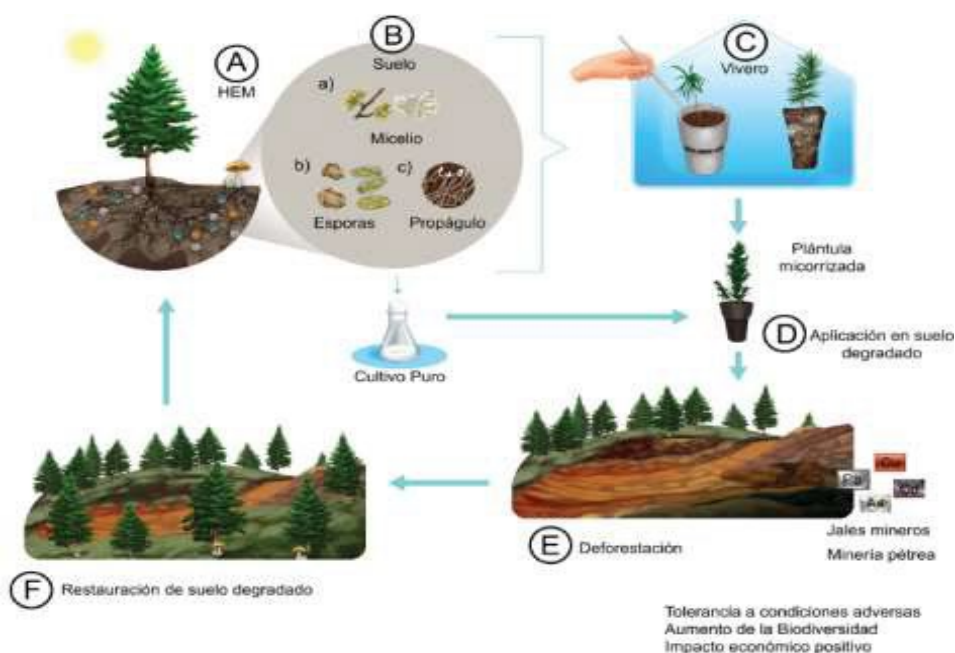


Figura 7. Aplicación de las ectomicorizas con fines de recuperación ecológica. A. Las especies de hongos micorrízicos se extraen de campo; B. Se identifican las estructuras del hongo asociado a la especie arbórea de interés (conífera nativa) y se realiza una caracterización de las estructuras microscópicas (a=micelio, b=esporas, c=propágulo) de las muestras de suelo; C. El inóculo se aplica directamente sobre la plántula de interés; D. Una vez que la planta es micorrizada se transplanta a macetas con suelo degradado como una forma de aclimatación; E. Una vez que la planta se adapta a esas condiciones se trasplantan en zonas degradadas (p. ej., áreas deforestadas o jales mineros donde hay presencia de metales pesados como plomo (Pb), cobre (Cu), arsénico (As) o cadmio (Cd)); F. La recuperación del suelo por árboles micorrizados ya establecidos también tiene beneficios para el ecosistema, pues ayuda con la restauración del suelo degradado. Ilustración de Gustavo Armando Rodríguez Sánchez.

Carrillo-Saucedo (2022) nos presenta: “a continuación, ... los tres principales métodos de inoculación en HEM”.

a) Inoculación esporal

De acuerdo con Rincón, et al. (2001, citado en Carrillo-Saucedo, 2022):

En este el inóculo es una suspensión de esporas maduras preparadas por trituración de carpóforos o esporomas maduros y limpios. Es un procedimiento económico y su preparación es relativamente sencilla. Se emplea en hongos que tienen una producción elevada de esporas, como son los géneros *Suillus Micheli*, *Scleroderma Pers.*, *Rhizopogon Fr.* y *Pisolithus Alb. & Schwein*; también cuando las esporas toleran períodos largos de almacenamiento a 4 °C. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Quiroz, et al. (2009, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comenta que: “El uso de este método requiere conocimientos micológicos mínimos para cosechar los carpóforos cuando las esporas están maduras e inocularlos en las especies vegetales más adecuadas”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Por lo tanto, Gómez-Hernández, et al. (2019, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “...recomienda inocular el sustrato al momento de la siembra y volver a inocular al menos cuatro o cinco veces más, para asegurar la germinación de las esporas y el desarrollo del micelio”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Para Arteaga-León, et al. (2018, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): “Este es el sistema de inoculación más recomendado para los HEM”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9). Sin embargo, para Valdés, et al. (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), existe una alternativa cuando nos informa que: “Una variante de la técnica es el remojar las raíces podadas en una suspensión esporal homogenizada (16 × 10⁸ esporas)”.

(Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9). Esta información es complementada tanto por Alarcón y Ferra-Cerrato (1999), como por Quiroz, et al. (2009) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), cuando señalan que esas raíces deben, además: “...trasplantarlas a recipientes con sustrato previamente esterilizado”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9)

Valdés, et al. (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), afirma que: “La inoculación esporal ha mostrado buenos resultados con plantas de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Gordon & Glend. inoculadas con *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker & Couch y *Scleroderma texense* Berg”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Castellano y Trappe (1985, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), complementa señalando que: **“En ensayos de vivero se han inoculado hasta siete millones de plantas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, utilizando el sistema de riego con esporas de *Rhizopogon vinicolor* Smith”**. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9) (La negrita es nuestra).

Casique Valdés, et al. (2019, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comenta que:

Las plántulas de *P. Greggii* Engelm. ex Parl micorrizadas en invernadero mejoraron su crecimiento en altura y diámetro cuando fueron inoculadas con *Geastrum minimum* Schwein, *Boletus barrowsii* Thiers & Smith y *Suillus caeruleus* A.H. Sm. & Thiers; mientras que cuando fueron inoculadas con *Russula xerampelina* Schaeff, la biomasa aumentó. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

b) Inoculación miceliar o vegetativa

Carrillo-Saucedo (2022) nos explica que:

Este método requiere de un inóculo obtenido a partir de un cultivo puro del hongo micorrízico de interés. El inóculo se obtiene mediante el aislamiento de hifas o

micelio de hongos que crecieron en medios de cultivo específicos (p. ej., papa dextrosa, extracto de malta, etc.), en un sustrato de turba de musgo humedecido, o por explantes de tejido vegetativo. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9)

Santiago-Martínez y Galindo Flores (2003, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), afirman que: “Es, posiblemente, el método más efectivo; sin embargo, algunos hongos muestran dificultad para crecer de forma aislada o tienen baja viabilidad después de su aislamiento”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9). Al respecto, Molina y Trappe (1994, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), ponen un ejemplo: “...*Rhizopogon vinicolor* Smith es un hongo que crece bien en el medio de cultivo, pero no coloniza las raíces de *Pinus radiata* D. Don cuando se utiliza como inóculo vegetativo”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9).

Carrillo-Saucedo (2022) señala que: “**El éxito de la micorrización con hongos ectomicorrízicos se puede distinguir y cuantificar a partir de las modificaciones morfológicas de las raíces micorrizadas** (Figura 3, recuadro E inciso b)”. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 9) (La negrita es nuestra).

c) Inoculación a partir de suelo

Quiroz, et al. (2009, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos explica señalando que este consiste en:

...utilizar como inóculo o propágulos muestras colectadas directamente del suelo, sin hacer una separación previa. El suelo contiene propágulos, que son las estructuras que conforman al hongo (micelios rizomorfos, esporas, esclerocios o trozos de raíces micorrizadas (Figura 7B); sin embargo, puede contener organismos patógenos o semillas de especies vegetales no deseadas. (Métodos generales de inoculación micorrízica, página 14) (La negrita es nuestra).

Carrillo-Saucedo (2022) comenta que:

En general, el método presenta buenos resultados, pero es variable en función del sitio de donde se obtiene el inóculo, ya que no se tiene un control sobre los otros agentes que pueda contener el suelo, además de los HEM deseados (Figura 7A-D). Por otra parte, **la extracción de suelo para obtener el inóculo no puede ser considerada como parte de una práctica de manejo sustentable, pues implica la remoción de un recurso no renovable.** Por lo anterior, se recomienda utilizar métodos que promuevan la conservación del suelo, como el manejo del inóculo dentro del sitio a través de plantas propagadoras. (Métodos generales de inoculación micorrízica, páginas 14-15) (La negrita es nuestra).

3) Complejidad simbiótica

Respecto a este tema, Linderman (1988, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), nos explica que:

“Entre la planta y el suelo existe una interfase muy específica conocida como micorrizósfera, que es la zona en la que se da la interacción entre el suelo, las raíces de las plantas y las hifas de los hongos”. (Complejidad simbiótica, página 15). Por su parte, Barea, et al. (2002, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), detalla que: **“La micorrizósfera es una zona muy compleja y dinámica donde se concentran los exudados de las raíces y de los hongos, los cuales son aprovechados por microorganismos que viven en el suelo”.** (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra).

3.1 Cómo operan

Azcón-Aguilar y Barea (2015, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), explican que: “Las interacciones que se llevan a cabo promueven el ciclaje, la disponibilidad y la captura de nutrientes y esto tiene repercusiones sobre el crecimiento, la salud de la planta y la calidad del suelo”. (Complejidad simbiótica, página 15)

Un tema importante, lo destacan Brundrett (2004) y López Ráez, et al. (2011) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), cuando coinciden en señalar que: “La señalización entre los hongos, las plantas y los microorganismos del suelo se lleva a cabo a través de señales químicas liberadas entre los participantes y el desarrollo de estructuras fúngicas especializadas”. (Complejidad simbiótica, página 15). Brundrett (2004); Futai, et al. (2008); Mello, et al. (2013) (todos ellos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), nos precisan que: “Estas últimas, como se había mencionado, son los arbúsculos y junto con la red de Hartig se especializan en la transferencia de nutrientes y la comunicación química”. (Complejidad simbiótica, página 15).

A continuación, y tal como señala Jansa, et al. (2013, citado en Carrillo Saucedo, 2022): “Luego de que esta se establece, el micelio fúngico se extiende en el suelo formando vías de señalización, entre hongos, plantas de la misma especie, plantas de distintas especies y microorganismos”. (Complejidad simbiótica, página 15), que según nos detalla Simard, et al. (2012, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), son “conocidas como **redes micorrízicas comunes (RMC) o common mycorrhizal network**”. (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra).

Teste, et al. (2009); Tedersoo, et al. (2010); Smith, et al. (2011); Kennedy, et al. (2012); Gorzelak, et al. (2015) (todos ellos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), destacan que: “Las RMC tienen gran importancia ecológica y evolutiva debido a sus efectos positivos en la supervivencia de hongos, microorganismos y plantas vinculadas”. (Complejidad simbiótica, página 15).

3.2 Su importancia

Sin embargo, como señala Johnson, et al. (2010, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), también importa: “...**el contenido de nutrientes en el suelo**”. (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra); o como señalan Tedersoo, et al. (2010); Smith, et al. (2011) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), también interesa: “el tipo de suelo, y las interacciones con otros organismos”. (Complejidad simbiótica, página 15).

Carrillo-Saucedo (2022) destaca que: **“En estas redes micorrízicas, su contribución principal consiste en transportar los nutrientes de la interfase suelo-planta y con ello favorecer la dinámica nutricional de los ecosistemas”**. (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra). Al respecto, Simard, et al. (1997); Smith y Read (2010) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), resaltan que: **“Por ejemplo, los aminoácidos adquiridos por un simbionte fúngico pueden moverse a través del micelio de la red y dispersarse entre plantas vecinas unidas por las RMC”**. (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra). Bending, et al. (2002, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), resalta que: **“...es el carbono que se filtra al suelo mediante la rizodepositación y que es capturado por las hifas y llevado a otra planta”**. (Complejidad simbiótica, página 15). Y, según Simard, et al. (1997, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), se observa: **“En las plántulas de *Pseudotsuga menziesii* (abeto de Douglas), ...una ganancia neta de carbono de 6%, producto de estas conexiones miceliales”**. (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra).

Para Kiers, et al. (2011, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): **“... la formación de estas RMC es un proceso complejo, lo cual se debe, por una parte, a que existe cierta preferencia y especificidad de la planta huésped por diversas comunidades de hongos”**. (Complejidad simbiótica, página 15); y, según Rutten y Gómez-Aparicio (2018, citado en Carrillo-Saucedo, 2022) al referirse a los: **“...microorganismos”**. (Complejidad simbiótica, página 15); y, como señalan Frisen, et al. (2011); van der Putten, et al. (2013); van der Heijden, et al. (2015) (todos ellos citados en Carrillo-Saucedo, 2022): **“...a la organización de las comunidades microbianas del suelo que modifican a su vez las características, diversidad y dinámica de la vegetación”**. (Complejidad simbiótica, página 15).

Bauman, et al. (2016), Erktan, et al. (2018), López-García, et al. (2018) (todos ellos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), sostienen que: **“Una vez formada la RMC, se promueve la interacción, retroalimentación y adaptación entre las comunidades de plantas y el microbioma edáfico, que favorece procesos**

ecosistémicos tales como el ciclaje de nutrientes y la formación del suelo". (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra).

Johnson, et al. (1996, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), enfatiza que: "La biocomplejidad de las interacciones ecológicas, como las expuestas, es analizada por modelos ecológicos que buscan entender cuáles factores determinan la presencia de ciertas especies para conservar las funciones de un ecosistema". (Complejidad simbiótica, página 15).

Hart, et al. (2001, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), comprueba que:

Los modelos que incluyen la presencia de las asociaciones micorrízicas muestran un aumento en la diversidad de especies tanto vegetales como de hongos, lo que puede tener repercusiones en los procesos y/o funciones del ecosistema, como es el caso de la productividad vegetal, p. ej. biomasa, contenido de clorofila, etc. (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra).

En efecto, según Klironomos, et al. (2000, citado en Carrillo-Saucedo, 2022): "**La biomasa vegetal aumenta entre 10 y 75% cuando se manipula la riqueza de plantas hospederas**". (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra); en tanto que, Hart, et al. (2001); Young (2015) (ambos citados en Carrillo-Saucedo, 2022), comprueban que: "...un aumento en la riqueza de hongos micorrízicos promueve un mejor establecimiento de las plántulas, ya que **aumenta la variación genética interespecífica y se favorece la colonización de las raíces**". (Complejidad simbiótica, página 15) (La negrita es nuestra).

Ji, et al. (2013, citado en Carrillo-Saucedo, 2022), refieren que:

Las interacciones bajo el suelo dependen del contexto ecológico, pues la respuesta de la planta huésped al hongo es variada. Los HMA obtenidos de suelos de diversas ubicaciones geográficas pueden ser inoculados en una planta y cuando esta es trasplantada en otros suelos (con variaciones en

textura, pH y niveles de nutrientes), la asociación simbiótica puede generar interacciones positivas o negativas, que pueden reflejarse en un aumento o disminución de la biomasa vegetal.

Por lo tanto, **la búsqueda de mejores alternativas para recuperar terrenos degradados por el cambio de uso del suelo debe considerar la planta, sus simbioses y las características físicas del suelo (pH, condiciones hídricas).** (Complejidad simbiótica, páginas 15-16) (La negrita es nuestra).

7. Menos agua y fertilizantes con el uso de micorrizas en horticultura

El Cambio Climático Global (CCG) viene alterando los ecosistemas y agudizando los eventos extremos, por ello, el tema que presentamos, en el marco del Programa de Protección Vegetal Sostenible del IRTA (Instituto de Investigación y Tecnología Alimentarias es fundamental.

Biel, et al. (2023) destaca lo siguiente:

La utilización de plantas micorrizadas en explotaciones hortícolas comerciales es baja debido a que la respuesta depende de la combinación planta/hongo, a las características del suelo y a que el coste-beneficio no ha sido contrastado, por lo que se presentan aquí en este artículo los resultados de un estudio realizado en el Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias (IRTA) en este sentido. (Menos agua y fertilizantes con el uso de micorrizas en horticultura, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Biel, et al. (2023) nos explica los desafíos que enfrentamos al señalar que:

Los retos principales de la agricultura del siglo XXI son los de asegurar la alimentación de una población humana en crecimiento constante bajo criterios de sostenibilidad y ante la amenaza del cambio climático. Entre los elementos esenciales para la sostenibilidad del medio agrícola se encuentran la calidad del agua y el suelo, y el mantenimiento de la biodiversidad. Por otro lado, la presencia de compuestos nitrogenados, especialmente nitratos, es el problema de contaminación más importante en las aguas subterráneas en Cataluña (España) y, a su vez, el principal responsable de las pésimas condiciones de sus masas de agua.

El origen de estos nitratos en el medio puede ser diverso, aunque suelen atribuirse, principalmente y según la Agencia Catalana del Agua, a las prácticas relacionadas con la actividad agrícola y ganadera, como son las referentes a **la aplicación de fertilizantes nítricos y amoniacales**, y al abonado con purines.

La gestión de la contaminación por nitratos de origen agrario está regulada en la Unión Europea por la Directiva de Nitratos (Directiva 91/676/CEE) y su transposición a través del Real Decreto 261/1996, que obliga a los Estados miembros a identificar la calidad de las aguas, a declarar vulnerables aquellas superficies territoriales en las que el drenaje pueda originar una contaminación por nitratos, bien se trate de aguas subterráneas, epicontinentales o costeras, y a aplicar las medidas de protección necesarias. Actualmente, un 33,8% de la superficie total de Cataluña está declarada como zona vulnerable a la contaminación por nitratos de origen agrícola, lo que supone una afectación en un total de 422 municipios, es decir, en el 45% de todos los municipios catalanes (según datos de la ACA de 2019).

Otro macronutriente presente en los suelos en los que se han aplicado fertilizantes, tanto orgánicos como inorgánicos, de forma continuada, es el fósforo. En algunas zonas de estos suelos puede existir un exceso de fósforo en ellas, pero puede estar inmovilizado debido al pH del mismo. Es en este sentido en el que el uso de plantas micorrizadas puede ayudar a su asimilación por parte de la planta.

Para poder realizar un uso sostenible de los recursos mencionados, la tecnología de las micorrizas puede optimizar la gestión de la nutrición de los cultivos, la del agua, y la recuperación de los suelos, consiguiendo una producción de alimentos más respetuosa con el medio ambiente.

La micorriza que forman los hongos formadores de micorrizas arbusculares con la mayoría de especies vegetales es una extensión funcional del sistema radical y del área de absorción que envuelve la raíz. **El micelio externo del hongo de la micorriza se extiende por la rizosfera provocando una mejora en la captación de nutrientes esenciales (fósforo, nitrógeno, hierro, cinc y cobre), mejorando la utilización de los recursos hídricos y la tolerancia frente a**

organismos patógenos. El micelio del hongo, adicionalmente, mejora la estructura y la estabilidad del suelo gracias a la formación de agregados que controlan la cantidad de agua disponible y afecta también a la difusión de los elementos minerales.

Estos hongos formadores de micorrizas arbusculares están presentes en la mayoría de los ecosistemas en equilibrio y son un recurso natural que contribuye a una agricultura sostenible. Muchas veces en los suelos agrícolas, debido a su degradación, la presencia de hongos formadores de micorrizas no siempre es suficientemente abundante para que los cultivos puedan beneficiarse. (Menos agua y fertilizantes con el uso de micorrizas en horticultura, párrafos 2-8) (La negrita es nuestra)

Aclaración: He ido en contra de lo que me había propuesto al extenderme en abundar en información al abordar este tema; ocurre que la importancia del mismo así lo ameritaba, debía esmerarme en entregar información suficiente como para motivar para que la idea cobre vida en un proyecto viable.

8. Los hongos micorrízicos y el “internet de las plantas”

El CIAD, a través de un grupo de académicos del Laboratorio de Biotecnología de Hongos y Plantas de la Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal desarrolla un documento que nos permite resumir nuestra preocupación en torno a las comunicaciones entre las plantas y los hongos.

En Saldaña, et al. (2024), se releva el hecho de que los hongos: “...por mucho tiempo se consideraron plantas, hoy en día sabemos que los hongos no lo son, primordialmente porque no realizan fotosíntesis”; y agrega que: “...los hongos han establecido un reino distinto al de las plantas, pero igual de complejo, diverso e interesante...” (párrafos 12).

Saldaña, et al (2024) muestra su interés al señalar que:

Algo igual de extraordinario es que **entre plantas y hongos existe una intrigante y compleja historia de comunicación ancestral. Es decir, existen unos hongos buenos y muy especiales que se denominan hongos micorrízicos, los cuales se asocian con las raíces de las plantas (viven en simbiosis), ayudándolas a resistir enfermedades o**

condiciones estresantes mediante mecanismos de intercambio de recursos, los cuales, en última instancia, les ayudan a desarrollarse y sobrevivir.... (párrafo 5) (La negrita es nuestra)

8.1 Pero ¿cómo está eso del “internet de las plantas” y cómo nos beneficia o afecta?

Saldaña, et al. (2024) nos explica que:

Sin duda alguna la estrecha relación de los hongos micorrízicos con las plantas sostiene una parte vital de nuestro planeta; sin embargo, podemos afirmar que dicha relación se ve amenazada por los múltiples impactos humanos a los ecosistemas (naturales y agrícolas). **Del mismo modo que decimos que el impresionante progreso humano alcanzado hasta el momento se explica y depende del avance tecnológico progresivo, de los algoritmos, la inteligencia artificial y del internet (e.g. teléfonos, computadoras, máquinas, vehículos, etc.), se podría decir que ese progreso hipertecnológico futuro de la humanidad, así como la salud y sostenibilidad de todos los ecosistemas (incluyendo los campos agrícolas de donde provienen todos nuestros alimentos), dependerá, significativamente, de las acciones humanas en favor de la conservación de los hongos micorrízicos y los servicios ambientales multifuncionales que ellos proporcionan.**

Son muy conocidas las ventajas de contar con conexión a la red global del internet por la cantidad y calidad de información que nos puede llegar a través de esta (a esta nota de divulgación científica estás accediendo de esa manera). Pues bien, **los muchos hongos micorrízicos que viven en el suelo se asocian y comunican positivamente con las raíces de las plantas, extendiendo sus micelios hacia las profundidades subterráneas para absorber, almacenar, transportar e intercambiar recursos vitales para la vida común.** (párrafos 6-7) (La negrita es nuestra)

Por su parte, Bücking, et al. (2016, citado en Saldaña, et al., 2024), complementa señalando que:

A este mecanismo muchos científicos prefieren llamarle “redes comunes micorrízicas”, aunque también se le ha denominado popularmente como el “internet subterráneo de las plantas”,

debido a que estos hongos simbióticos forman complejas y eficientes redes conectivas subterráneas para el tránsito eficiente de recursos, permitiendo el establecimiento, desarrollo y sobrevivencia de las plantas. (párrafo 7) (La negrita es nuestra).

Saldaña, et al. (2024) precisa que:

En realidad, la ciencia sigue estudiando y debatiendo sobre la funcionalidad de las conexiones de estos hongos simbióticos especiales. **Lo cierto es que dichas redes comunes micorrízicas están formadas por múltiples y muy diminutas tuberías llamadas “hifas”, que en conjunto forman el micelio de los hongos, el cual se ramifica mucho y se entrelaza con las raíces de una o más plantas, de la misma o diferentes especies, al mismo tiempo...**

Entre las funciones primordiales que realizan todos los hongos micorrízicos, está el participar en el intercambio de carbono por nutrientes (e.g. fósforo y nitrógeno y algunos microelementos). Pero aún hay más: ese intercambio de señales bioquímicas resulta ser el centro de la conexión entre las plantas y los hongos simbióticos. Es decir, a través de la red de hifas micorrízicas viajan señales bioquímicas que alertan a las plantas sobre posibles amenazas o cambios en el entorno, o bien, estimulan su crecimiento... (párrafos 8 y 9) (La negrita es nuestra).

Y, Song et al. (2015, citado en Saldaña, et al, 2024), nos presenta los resultados de un experimento en donde se confirma este compartimiento, al comentarnos sobre:

...un cultivo de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) inoculadas con un hongo micorrízico (*Funneliformis mosseae*) para probar la inducción de resistencia de las plantas a la infección de un hongo fitopatógeno *Alternaria solani*. Observaron que cuando se inoculó el hongo fitopatógeno en aquellas plantas que contenían los hongos micorrízicos, su respuesta defensiva fue mejor. (párrafo 9).

Saldaña, et al., 2024, párrafo 10 nos explica que: **“La inducción de resistencia a patógenos es otro fenómeno intrigante que**

puede ocurrir durante la interacción entre plantas y hongos simbióticos". (párrafo 10) (La negrita es nuestra).

Bücking, et al. (2016, citado en Saldaña, et al., 2024, expresa que:
...**la disminución en el intercambio micorrízico de recursos hacia una planta que está bajo el estrés por causa de un patógeno puede desencadenar una respuesta de señalización (una especie de señal de alerta bioquímica) que viaja a través del "internet de las plantas" (los hongos micorrízicos), promoviendo una respuesta defensiva y la liberación de compuestos orgánicos volátiles en otras plantas sanas...** (párrafo 10) (La negrita es nuestra)

Saldaña, et al. (2024) comenta que: "Aunque aún son desconocidos muchos de los mecanismos y moléculas involucradas, en última instancia la comunicación e intercambio bioquímico subterráneo a través de redes comunes micorrízicas ocurre y podría promover múltiples cambios funcionales en las plantas". (párrafo 10).

8.2 Relevancia

En Saldaña, et al. (2024), se pregunta:

¿Qué relevancia tiene entonces estudiar las redes de hongos simbióticos del suelo, o si prefieres, el internet de las plantas? Los hongos micorrízicos no solamente ayudan a las plantas a defenderse de otros organismos, sino que también las ayudan a enfrentar otros desafíos ambientales, como pueden ser, la sequía o la salinidad, entre otros. Ello tiene múltiples beneficios indirectos para la humanidad, ya que las redes comunes micorrízicas son omnipresentes y, sobre todo, tienen implicaciones prácticas para la agricultura del futuro... Sin embargo, los desafíos son importantes ante un clima más cálido y ante los múltiples impactos antropogénicos negativos hacia los ecosistemas (naturales o agrícolas). (párrafo 11) (La negrita es nuestra).

Le Provost, et al. (2023, citado en Saldaña, et al., 2024), nos informa que:

Actualmente se exploran métodos para mejorar el manejo de los suelos de todo el mundo, a través de la protección y

conservación de la biodiversidad de hongos simbióticos nativos (junto con otros organismos del suelo), para de esta manera impulsar la producción sostenible de alimentos en el corto y largo plazo. (párrafo 11) (La negrita es nuestra).

Saldaña, et al. (2024), concluye señalando que:

...en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) se realizan algunos estudios ecofisiológicos relacionados con hongos micorrizicos nativos y su relación con plantas emblemáticas del paisaje sonorense, como son el chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) y el agave (*Agave angustifolia*). **Estas plantas nativas han coevolucionado con las redes comunes micorrízicas para adaptarse a las condiciones áridas y semiáridas de la región.** Cada vez que veas la hermosa diversidad de plantas del desierto sonorense, recuerda que en el suelo nativo viven valiosos aliados: los hongos micorrízicos. (párrafo 12) (La negrita es nuestra).

8.3 Breve recuento de los singulares aportes resultantes de la simbiosis de las plantas micorrizadas

He escrito este recuento, con la expresa intención de facilitar, a quien me lea, el atender cabalmente, la enorme importancia de aquello que otorga fundamento a la propuesta que propongo.

- ✓ Las hifas de los hongos micorríticos, posibilitan la comunicación de las plantas entre sí; lo hacen con vegetales de la misma especie, como con aquellos de otras especies.
- ✓ Cuando una planta es atacada por un herbívoro o una plaga, comunica a las otras plantas, cercanas a su entorno, lo que está ocurriendo, alertándolas para que segreguen alguna sustancia (repelente) que evite ser atacadas.
- ✓ Las plantas hospederas de micorrizas muestran mayor resistencia al estrés, biótico como al abiótico así mismo, muestran mayor resistencia a las altas temperaturas.
- ✓ Mediante las Hifas, transfieren nutrientes a otras plantas, adicionalmente, transfieren mensajes moleculares de ARN (ácido ribonucleico) para silenciar genes específicos que generan rechazo a la aceptación, por las raíces, a ser micorrizadas.

- ✓ Mejora los rendimientos de los cultivos al promover un mayor desarrollo radicular, ampliando, con ello, la superficie de absorción de nutrientes; adicionalmente, hace posible que algunos compuestos químicos, como el fosforo, que se encuentran en forma no asimilables, se tornen asimilables.
- ✓ Facilita la recuperación de suelos degradados.
- ✓ Contribuye a la eliminación de metales pesados cuando estos se encuentran presentes en los suelos.
- ✓ Los cultivos micorrizados, son menos exigentes en agua como de fertilizantes.

8.4 El pésimo estado de situación que muestra la agricultura a nivel del planeta

El Cambio Climático Global está determinando los siguientes, principales, efectos / consecuencias:

- Disminución de la producción y productividad de los cultivos, debido, sobre todo a los eventos extremos.
- Incremento sostenido de la desertificación.
- Aumento de la erosión de los suelos.
- Pérdida de biodiversidad.
- Extinción de especies vegetales en zonas alto andinas debido al calentamiento global (subida de piso altitudinal de los cultivos).
- La pérdida de glaciares (perdida de reservas de agua) disminuye la alimentación de cursos de agua (ríos), como de aguas subterráneas.

Otras expresiones de la agricultura moderna que afecta al medio ambiente, y la vida en sus distintas expresiones:

- Agricultura adicta a: energía fósil la cual genera efecto invernadero (mecanización) como de fertilizantes químicos nitrogenados los cuales contamina la atmosfera, el suelo como las aguas subterráneas; también adicta a pesticidas que dañan la salud humana, rompe el equilibrio biológico y dañan la vida microbiana del suelo. Finalmente, ganada por el monocultivo.
- Mención aparte, merece el agresivo ingreso de los transgénicos y del paquete tecnológico que implica su uso, como son los herbicidas (Glifosato y otros) que además de afectar, notablemente, la biodiversidad, hacen lo propio con la salud humana y animal.

Anexo 1

Videos sobre la Comunicación de las Plantas

DOCUMENTO	CONTENIDO
Constatan conversación entre plantas en un experimento biológico. Fuente: UnoTV Link: https://www.youtube.com/watch?v=FFfB10aEUx4	Biólogos japoneses documentan por primera vez la Comunicación entre las plantas
Los árboles hablan entre ellos en secreto y esto es lo que dicen. Fuente: Alejandra Martins BBC Mundo Link: https://www.bbc.com/mundo/noticias-48311342	A través de una animación se explica cómo se realiza la comunicación entre los árboles
Los árboles hablan entre ellos. Científicos lo demuestran Fuente: Saciando la curiosidad Link: https://www.youtube.com/watch?v=hYEXI9lOjcQ	Nos muestra como en el mundo vegetal también existe una forma de inteligencia, aunque menos avanzada que la humana, pero aun así muy compleja. Ello permite que los árboles consigan comunicarse y ayudarse los unos a los otros.
Árboles inteligentes Fuente: The Documentary Collection Link: https://www.youtube.com/watch?v=MS_nexCIVno	¿Los árboles hablan y conocen sus vínculos familiares? El silvicultor alemán Peter Wohlleben y la científica Suzanne Simard han estado observando e investigando la comunicación entre los árboles durante décadas. La vieja pareja de árboles que se cuida mutuamente, los árboles madre que amamantan a sus hijos, etc. Lo especial de este vídeo es que comparan sus experiencias con las últimas investigaciones científicas forestales subyacentes.
Wood Wide Web': la red oculta debajo de nuestros bosques Fuente: BBC News Mundo Link: https://www.bbc.com/mundo/noticias-48534549#:~:text=BBC%20News%2C%20Mundo-,%22Wood%20Wide%20Web%22:%20el%20mapa%20que%20muestra%20la%20asombrosa,conexiones%20subterr%C3%A1neas%20entre%20los%20%C3%A1rboles&text=Disculpe.,este%20contenido%20no%20est%C3%A1%20funcionando.&text=Los%20%C3%A1rboles%20est%C3%A1n%20conectados%20por,as%C3%AD%20como%20internet%20de%20madera.&text=Ahora%2C%20un%20equipo%20de%20cient%C3%ADficos,%2C%20A1Suscr%C3%ADbete!	Los árboles están conectados por una red subterránea de hongos que les proporcionan nutrientes y ayuda a compartir recursos entre ellos. Este sistema se llama "Wood Wide Web", algo así como internet de madera. Es el mapa que muestra la asombrosa red de conexiones subterráneas entre los árboles.
Cómo los árboles se comunican entre sí Fuente: TED Takeaways Link: https://www.ted.com/talks/suzanne_simard_how_trees_talk_to_each_other?language=es&subtitle=es	"Un bosque es mucho más de lo que ven", dice la ecologista Suzanne Simard. Sus 30 años de investigación en los bosques canadienses la llevaron a un descubrimiento increíble: Los árboles hablan y se comunican a través de enormes distancias. Aprendamos más sobre las armoniosas y complicadas vidas de los árboles y prepárense para ver el mundo natural con nuevos ojos

DOCUMENTO	CONTENIDO
Suzanne Simard Árboles Madre y el Bosque Social Fuente: The Long Now Foundation	La ecóloga forestal Suzanne Simard revela que los árboles forman parte de un ciclo vital complejo e interdependiente; que los bosques son criaturas sociales y cooperativas, conectadas a través de redes micorrízicas subterráneas mediante las cuales los árboles comunican su vitalidad y vulnerabilidades, y comparten e intercambian recursos y apoyo.
Link: https://www.youtube.com/watch?v=ydbzrun3opk	
La Resiliencia y la Resistencia de los Hongos Fuente: Show Me The World	Los hongos, antiguos colonizadores de la tierra, forman un vasto reino distinto de las plantas y los animales. Sobrevivieron a condiciones extremas desarrollando inteligencia adaptativa. La investigación moderna explora sus funciones como constructores químicos y sanadores ambientales. El micólogo Paul Stamets destaca su potencial en medicina y descontaminación de suelos mediante micorremediación. Las redes de micelio descomponen los desechos, enriquecen el suelo e inspiran avances tecnológicos. Los hongos son cruciales en la simbiosis agrícola y en proyectos de reforestación como la Gran Muralla Verde de África. Con menos del 15% de las especies de hongos identificadas, los descubrimientos futuros son inmensamente prometedores para la medicina, la industria y la sostenibilidad ambiental.
Link: https://www.youtube.com/watch?v=LKtQ9p25ek0	
Micorrizas en el desierto ¿Es posible? Usos prácticos del micelio Fuente: ahora permacultura y sostenibilidad	¿Es útil el micelio para sostener el suelo? ¿se puede usar en el baño seco? ¿cómo podemos incorporar hongos y micorrizas en el desierto? En este vídeo, profundizamos en el tema de las micorrizas, concretamente en el uso de la especie stropharia rugosoannulata.
Link: https://www.youtube.com/watch?v=DE7pB5pN9Ck	

Anexo 2

Cómo se comunican las Plantas entre sí

La comunicación entre las plantas es un tema que ha sido objeto de estudio en los últimos años. Aunque las plantas carecen de un sistema nervioso centralizado como el de los animales, han desarrollado una variedad de mecanismos para intercambiar información y coordinar respuestas a su entorno. Algunas de las formas principales de comunicación entre las plantas las mostramos a continuación:

1. Señales químicas

Según nos explica, en la publicación “Espores. La Veu del Botanic”, el biólogo Abel Cerdá (2019):

En cualquier situación comunicativa, cuando se envía un mensaje este ha de hacer uso de un lenguaje comprensible por parte del receptor, **en el caso de las plantas este lenguaje está compuesto por unas moléculas llamadas componentes orgánicos volátiles (COV)**. Estas moléculas son metabolitos secundarios que sintetiza la planta para su funcionamiento fisiológico, y que se encuentran almacenados en reservorios celulares. En el momento en el que la planta sufre algún tipo de ataque, estos serán liberados al medio aéreo, por el cual viajarán a las plantas vecinas, creando de esta manera una comunicación entre ellas.

De COV hay una gran cantidad de tipos diferentes, que se diferencian por su composición y estructura. Esta gran variedad es debido a que para determinados tipos de lesiones se liberan unos COV concretos, y también a que ciertas especies de plantas sintetizan COV exclusivos, lo que significa que no todas las especies de plantas tienen los receptores adecuados para poder recibir y comprender todos los cov diferentes. (Lanzar mensajes al aire, párrafos 1-2) (La negrita es nuestra).

2. Redes micorrízicas

Abel Cerdá (2019), respecto a este tipo de comunicación señala que:

De la misma manera que el ser humano ha desarrollado formas de comunicación diferentes al habla, las plantas también se pueden comunicar mediante la rizosfera, es decir, la zona donde actúan las raíces. En este tipo de comunicación, a diferencia de la aérea, se

utilizan mediadores biológicos, que no son otros que los compañeros simbioses de las plantas, los hongos.

Hongos y plantas forman una simbiosis subterránea llamada red de micorrizas, una especie de Internet del mundo vegetal que puede poner en contacto mediante una misma red a todas las plantas de un bosque, llegando a distancias de kilómetros cuadrados. En consecuencia, gracias a este fenómeno las diferentes plantas se perciben y reconocen entre sí a través del transporte de señales y compuestos entre las raíces y las hifas. Por lo tanto, estos compuestos actúan como neurotransmisores que se mueven a través de las “sinapsis” entre las paredes celulares de las raíces de plantas e hifas de los hongos. (La comunicación en el subsuelo, párrafos 1-2) (La negrita es nuestra).

Estas redes formadas por hongos que se asocian con las raíces de las plantas, permiten el intercambio de nutrientes y señales químicas. A través de estas redes, una planta puede advertir a otras sobre la presencia de herbívoros o condiciones adversas, o incluso, compartir recursos como agua y nutrientes.

3. Señales eléctricas

En un artículo de la publicación “20minutos”, la periodista Isabel Valle (2024) nos explica que:

Otra forma de comunicación entre las plantas es la eléctrica, es decir, el uso de impulsos eléctricos que viajan por las células y los tejidos vegetales. Surgen debido a cambios en el potencial de membrana celular, desencadenados por estímulos tanto internos como externos. Por ejemplo, la detección de luz, la temperatura, la gravedad, el nivel de humedad, de nutrientes e, incluso, de patógenos, puede desencadenar la generación de señales eléctricas que alteran la fisiología y el comportamiento de la planta.

Lo más fascinante es que estas señales eléctricas pueden propagarse entre plantas, especialmente cuando están **conectadas por sus sistemas de raíces o por hongos simbióticos** que forman redes subterráneas. **Como si se tratara de una red de ‘internet vegetal’, pueden intercambiar nutrientes, agua e información entre ellas,**

tal como algunos estudios han demostrado. (Señales eléctricas para el comportamiento, párrafos 1-2). (La negrita es del autor).

4. Comunicación acústica

Francisco González (2024) en un artículo para INFOBAE nos explica que:

...la emisión de sonidos ultrasónicos, un campo de investigación reciente, sugiere que las plantas pueden “hablar” en frecuencias que no son audibles para los humanos, pero que pueden ser percibidas por otros organismos.

La emisión de sonidos ultrasónicos por parte de las plantas fue documentada por primera vez en un estudio de la **Universidad de Tel Aviv**. En esta investigación, liderada por **Lilach Hadany**, **se observó que especies como cactus, emiten sonidos de alta frecuencia cuando están bajo estrés, como en condiciones de sequía o tras sufrir daños físicos.**

Esta investigación también llegó a la conclusión de que estos sonidos, que se producen debido a la cavitación en la xilema (el tejido encargado de transportar agua y nutrientes), **no son audibles para los humanos, pero pueden ser detectados por otros seres vivos, como insectos y pequeños mamíferos.** La teoría sugiere que **estos sonidos podrían servir para alertar a otras plantas cercanas o incluso para atraer a organismos que puedan ayudar en su defensa, como insectos depredadores** que se alimentan de los herbívoros que las atacan. (párrafos 8-10) (La negrita es nuestra).

5. Señales ópticas

Gabriela Aceitón de Meteored Chile (2024) nos explica que:

A diferencia de otros organismos vivos, las plantas no tienen un órgano de la visión comparable con los ojos. Sin embargo, bien conocida es su sorprendente **capacidad de determinar el origen de una fuente luminosa.**

Percibir de dónde viene la luz es especialmente importante para las plantas, que utilizan esta información para posicionar sus órganos a medida que crecen, un fenómeno conocido como fototropismo.

Resulta que **las plantas tienen algo sorprendente en sus tallos llamado “canales de aire”**. Estos son espacios entre las células que no solo facilitan el paso del aire, sino que también **limitan la cantidad de luz que atraviesa ¡Son como pequeñas cortinas de luz dentro de las plantas!** (La planta ve gracias a canales de aire, párrafos 1-2) (La negrita es del autor).

La función de estos canales, según Gabriela Aceitón (2024] consistiría en que:

Estos canales aumentan la dispersión de la luz, especialmente en los hipocótilos -parte de la planta que germina de la semilla- de las plántulas. Esto tiene un efecto impresionante, **creando un gradiente de luz que es esencial para una respuesta de crecimiento eficiente...** (El secreto está en la óptica, párrafo 3) (La negrita es del consultor).

Por su parte, en un artículo de la Dra. Silvia Lomáscolo (2022) en el CONICET, se nos explica que:

El color en la naturaleza es un mediador clave de la comunicación entre plantas y animales. Las plantas, como organismos sésiles, necesitan de vectores para el transporte de sus gametas y de sus semillas, para completar el proceso de reproducción. Por lo tanto, el color puede interpretarse como una señal de las plantas a sus animales mutualistas, ya sean polinizadores, atraídos a sus flores, o como dispersores de semillas, atraídos a sus frutos. (Resumen).

Anexo 3

Científicos japoneses captaron en video el momento inédito en la que dos plantas ‘conversan’ para lograr salvarse del peligro

Renzo Loza, periodista del diario La República, publicó un artículo (2025) en el que detalla lo siguiente:

El experimento utilizó **plantas de tomate y maleza**, revelando que las plantas sanas reactivan rápidamente sus defensas tras recibir advertencias de las atacadas, evidenciando redes de comunicación sofisticadas.

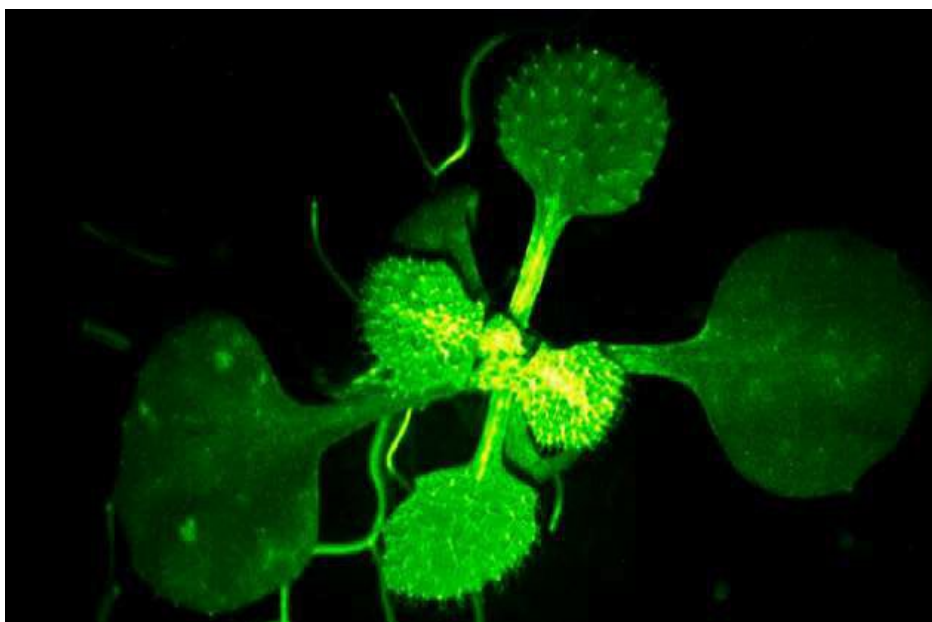


Figura 8. El experimento revela a dos especies de plantas que realizan una comunicación química y casi imperceptible. Foto: Captura.

Por primera vez, un equipo de biólogos en Japón ha logrado documentar la **comunicación entre dos plantas mediante señales químicas frente a posibles amenazas**. La investigación, liderada por el biólogo molecular Masatsugu Toyota, demostró que estos organismos pueden percibir compuestos emitidos por plantas vecinas y **activar respuestas defensivas específicas, revelando la existencia de un complejo lenguaje vegetal sustentado en señales moleculares**.

El estudio, publicado por investigadores de la Universidad de Saitama, reveló que las plantas utilizan redes de comunicación vegetal basadas en señales químicas y físicas para enviar mensajes de alerta. **Este descubrimiento sería clave para la ecología química y la defensa contra plagas en cultivos.** (párrafos 1-3) (La negrita es del autor).

Pero, ¿cómo opera este mecanismo? Al respecto, Loza (2025) nos explica:

Las plantas emplean un **lenguaje invisible basado en compuestos químicos volátiles** y cambios físicos para interactuar entre sí. Cuando una planta enfrenta un ataque de plagas o está sometida a estrés ambiental, libera moléculas que pueden ser detectadas por sus vecinas. Estas señales químicas en plantas activan mecanismos de defensa en especies cercanas, permitiéndoles prepararse ante amenazas inminentes. (¿Cómo se comunican las plantas?, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

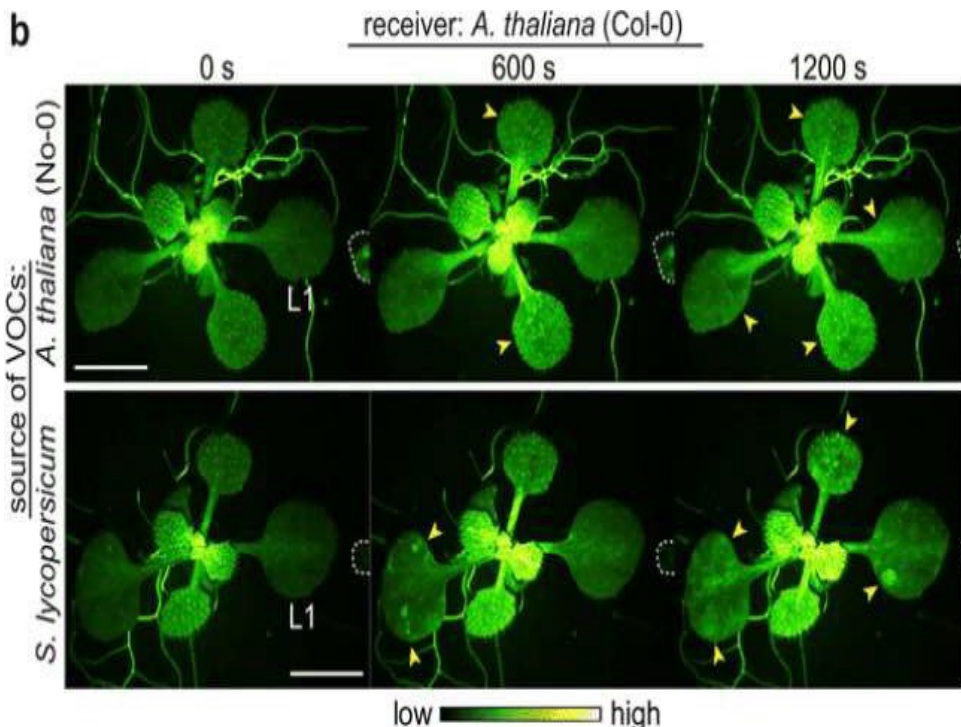


Figura 9. El experimento registra cómo las plantas realizan procesos químicos para comunicarse ante la amenaza de una oruga. Foto: Nature.

Loza (2025) amplía la explicación, detallando la forma de cómo se realizó el experimento. Al respecto nos comenta:

El equipo de Toyota utilizó **plantas de tomate y maleza**. Emplearon un sistema de bombas para transferir compuestos liberados por plantas dañadas hacia otras sanas. Para monitorear las respuestas, utilizaron biosensores fluorescentes que emitían luz verde al detectar cambios en los niveles de calcio celular.

Durante el estudio, las plantas intactas reaccionaron de inmediato al recibir las advertencias aéreas. Sus hojas mostraron ráfagas de señales de calcio, indicando una activación en sus sistemas de defensa. Esta respuesta confirmó la existencia de **redes de comunicación vegetal** altamente sofisticadas.

(¿Cómo se realizó el experimento entre ambas plantas?, párrafos 1-2) (La negrita es nuestra)

TEMA 2

TEMAS COMPLEMENTARIOS

En este tema, facilitamos información que guarda estrecha relación con lo visto en la Comunicación de las Plantas y que lo complementa.

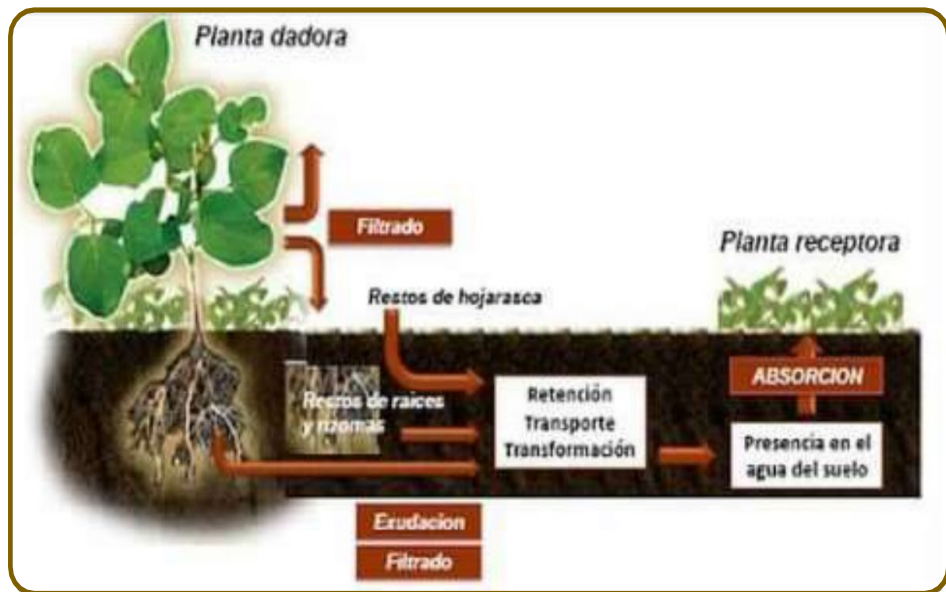
El primer documento, esta referido al fenómeno natural en el que una planta libera sustancias químicas al medio ambiente que influyen en el crecimiento y desarrollo de otras plantas, ya sea positiva o negativamente. **Este tipo de comunicación química corresponde a lo que se conoce como Alelopatía.**

A continuación, se revisan las implicancias que en el marco del Cambio Climático Global tienen las denominadas ‘Plantas de Resurrección’. Jill Farrant, una de sus principales investigadoras, en una conferencia en TED Global (diciembre del 2015) nos resumía la importancia de esta investigación al señalarnos que: **“Lo que están tratando de hacer rápidamente es repetir lo que la naturaleza hizo en la evolución con las plantas de resurrección hace entre 10 y 40 millones de años”.**

Presentamos **información relevante respecto a la Yareta**, que es una especie resinosa, que crece en condiciones de clima muy riguroso y siempre se la encuentra por encima de los 4,000 m.s.n.m. en la alta cordillera altiplánica del Sur del Perú hasta el Norte de Chile y las regiones limítrofes de Bolivia. Es una especie que en condiciones de cambio climático puede resultar muy ilustrativa.

Continuamos con la explicación de un hidrogel con cianobacterias que podría ser una solución para combatir el cambio climático, debido a que es capaz de capturar dióxido de carbono (CO₂) de manera eficaz, mientras genera minerales que lo almacenan de forma estable.

Finalizamos presentando la capacidad de las higueras para convertir el CO₂ atmosférico en piedra, mediante un proceso natural de mineralización, lo que igualmente se podría constituir en un mecanismo para combatir el cambio climático.



LA ALELOPATÍA

Resaltamos su importancia para lograr mayor resiliencia en los cultivos frente al Cambio Climático Global, lo que amerita que se inviertan mayores recursos en las investigaciones en curso

La Alelopatía

1. Introducción

Para una mejor comprensión del tema, la Enciclopedia Química.es (s/f) nos explica lo siguiente:

Los organismos vegetales están expuestos a factores tanto bióticos como abióticos, con los que han evolucionado. Esto provocó el desarrollo en los vegetales de numerosas rutas de biosíntesis a través de las cuales sintetizan y acumulan en sus órganos **una gran variedad de metabolitos secundarios. Se sabe que estos metabolitos juegan un papel vital en las interacciones entre organismos en los ecosistemas.** Entre estos encontramos compuestos producidos por plantas que provocan diversos efectos sobre otros organismos.

A estas sustancias se les conoce como aleloquímicos y el fenómeno se designa aleloquimia, o alelopatía cuando se establece entre individuos vegetales. Algunos biólogos han considerado que la alelopatía es parte de la competencia. Sin embargo, la competencia entre plantas involucra la reducción en la disponibilidad de algún factor del entorno, debido a su utilización por un individuo vegetal, que es requerido también por otra planta que comparte el mismo hábitat.

En cambio, la alelopatía implica la liberación al entorno por parte de una planta de un compuesto químico que ocasiona un efecto sobre otra. Estos conceptos son diferentes entre sí, pero desde un punto de vista ecofisiológico se pueden considerar estrechamente ligados y complementarios en su efecto. **Para evitar confusiones se utiliza el término interferencia para designar al efecto total de una planta sobre otra, es decir, la suma de efectos debidos a los fenómenos de competencia y alelopatía.**

Los monoterpenos que son los principales componentes de los aceites esenciales de los vegetales y son los terpenoides inhibidores de crecimiento más abundantes que han sido identificados en las plantas superiores. Son conocidos por su potencial alelopático contra malezas y plantas de cultivo. Entre los más frecuentes con actividad alelopática se pueden citar el alcanfor, a y b pineno, 1,8-cineol, y dipenteno. Dentro de las plantas que los producen

podemos citar los géneros *Salvia* spp, *Amaranthus*, *Eucalyptus*, *Artemisia*, y *Pinus*. (Párrafo 1, 3) (La negrita es nuestra).

En general podemos apreciar que:

En las comunidades bióticas, muchas especies se regulan unas a otras por medio de la producción y liberación de repelentes, atrayentes, estimulantes e inhibidores químicos. La aleopatía se ocupa de las interacciones químicas planta-planta y planta-organismo, ya sean estas perjudiciales o benéficas.

La aleopatía es pues, el fenómeno que implica la inhibición directa de una especie por otra ya sea vegetal o animal, **usando sustancias tóxicas o disuasivas. La agricultura biológica hace buen uso de todo esto para proteger los cultivos del ataque de algunos insectos-plagas mediante la intercalación de plantas aromáticas dentro del cultivo. Por ejemplo, al intercalar ruda en los cultivos de papa.**

Estas relaciones se hacen especialmente importantes a medida que las plantas adultas sintetizan esencias y aromas característicos. **El fríjol verde y la fresa, por ejemplo, prosperan más cuando son cultivados juntos, que cuando se cultivan separadamente. La lechuga sembrada con espinacas se hace más jugosa cuando se siembra en una proporción de 4 a 1.**

Algunas plantas segregan unas sustancias tóxicas que no permiten ser cultivadas en asociación, un ejemplo de éstas es el ajenojo cuyas raíces son tóxicas; sin embargo, estas mismas sustancias controlan pulgas y babosas cuando se utilizan en forma de té; también aleja los escarabajos y gorgojos de los granos almacenados. El hinojo, el eneldo y el anís rechazan insectos terrenos. (Enciclopedia Química. es, Definición de Aleopatía, párrafos 1-4) (La negrita es nuestra).

Según Kil-Ung & Dong-Kyun (2004):

La aleopatía es definida como la influencia directa de un compuesto químico liberado por una planta sobre el desarrollo y crecimiento de otra planta. Es un hecho conocido que sustancias alelopáticas son inducidas por estreses ambientales tal como se indica en la Figura 10. Los compuestos alelopáticos pueden ser liberados de las plantas al ambiente por medio de la exudación de

las raíces, lixiviación, volatilización y descomposición de los residuos de las plantas en el suelo (Figura 10).

Las sustancias alelopáticas, si están presentes en las variedades de las especies cultivadas, pueden reducir la necesidad del manejo de malezas, especialmente el uso de herbicidas. La alelopatía por si sola puede no ser una perfecta tecnología de manejo de malezas, pero puede ser una herramienta suplementaria para el control de malezas. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Introducción, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

Y como señala Christensen (1993, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): “Es extremadamente difícil demostrar la influencia de la alelopatía en la naturaleza dada la complejidad de la interferencia de las plantas que incluye efectos positivos, negativos y neutros entre las mismas”. (Introducción, párrafo 1).

Al respecto, Duke, et al. (2001, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004) señalan que: “La interferencia es una combinación de los procesos de competencia por los recursos y la producción de **compuestos alelopáticos que suprime los competidores**”. (Introducción, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

KilUng & DongKyun (2004) resaltan que: “Por ello, la alelopatía difiere de la competencia por recursos. **La investigación sobre la alelopatía ha sido llevada a cabo durante varias décadas, pero los conocimientos son aún limitados**”. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Introducción, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

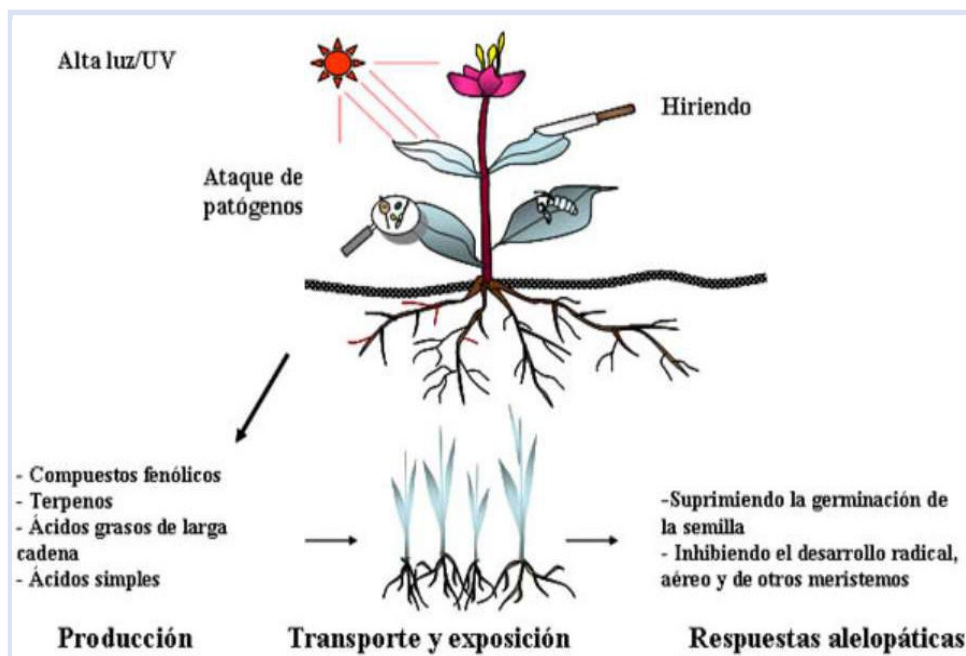


Figura 10. Inducción de Aleloquímicos.

Khush (1996, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004) nos explica que:

El mejoramiento de cultivares de las plantas cultivadas es la única área que no ha sido suficientemente explotada como una estrategia de manejo de las malezas. **La posibilidad de incorporar características alelopáticas en cultivares mejorados de arroz que podrían reducir la necesidad de aplicar herbicidas** al cultivo debería ser cuidadosamente considerada. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Introducción, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

Y Duke, et al. (2001, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004) enfatiza explicándonos que: **“Por supuesto, hasta ahora no se han obtenido cultivares comerciales con propiedades alelopáticas”**. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Introducción, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

Sin embargo: “se ha informado del potencial alelopático de numerosos cultivos”, como por ejemplo según Lovett y Hoult (1995, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): la “...cebada...”; Putman y

Duke (1974, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): el “... pepino...”; Fay Duke (1977, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): la “...avena...”; Dilday, et al. (1998, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): el “...arroz...”; Nimbal, et al. (1996, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): el “...sorgo-...”; Leather (1983, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): el “...girasol...”; Patrick, et al. (1963, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): el “...tabaco...”; y Wu, et al. (1999, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004): el “...trigo...”. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Introducción, párrafo 2).

2. Generalidades

Debemos de considerar que:

El efecto alelopático de una planta sobre otro organismo no es total para bien o para mal, sino que está regido por manifestaciones de mayor o menor grado según sean las características de los organismos involucrados. Sin embargo, **el potencial de productos naturales que pueden ser usados por sus propiedades biológicas particulares como herbicidas, plaguicidas, antibióticos, inhibidores o estimulantes de crecimiento, etc., es prácticamente inagotable.**

El estudio de las interacciones químicas entre las principales especies de un agro ecosistema y del impacto de los aleloquímicos en la dinámica y en la producción de los mismos, debe conducirnos hacia metas ecológicas y hacia la búsqueda de mayor información que nos permita aprovechar dicho potencial.

Estos productos naturales tienen múltiples efectos como se señaló en la definición, efectos que van desde la inhibición o estimulación de los procesos de crecimiento de las plantas vecinas, hasta la inhibición de la germinación de semillas, o bien evitan la acción de insectos y animales comedores de hojas, así como los efectos dañinos de bacterias, hongos y virus. **Así, los productos naturales conforman una parte muy importante de los sistemas de defensa de las plantas con la ventaja de ser biodegradables.**

Numerosas investigaciones científicas han demostrado que los productos cultivados con el sistema orgánico, tienen más materia seca y por lo tanto más valor nutritivo por kilogramo de peso.

Por ejemplo, una coliflor pequeña tiene menos agua y posee mayor valor nutritivo y mayor capacidad de conservación que una grande de cultivación química que contiene más agua.

Los alimentos cultivados con productos químicos, además de disminuir la calidad de los productos para el consumidor, resultan también dañinos en su estructura biológica, molecular y química, pues algunos minerales aumentan mientras que los más indispensables disminuyen, creándose un desequilibrio y así alterando la salud e integridad del cuerpo. (Enciclopedia Química.es, Generalidades, párrafos 1-5) (La negrita es nuestra).

3. Importancia en la obtención de nuevas variedades

Según nos explica Kil-Ung & Dong-Kyun (2004):

Las recientes investigaciones sobre la alelopatía del arroz han avanzado la posibilidad de obtener cultivos alelopáticos de arroz por las siguientes razones:

- existe variación en la alelopatía de los cultivares de arroz;
- la alelopatía tiene una función importante bajo las condiciones de campo;
- **la alelopatía en el arroz es efectiva sobre monocotiledóneas y dicotiledóneas;**
- la identificación de los compuestos aleloquímicos del arroz ha hecho importantes progresos; y,
- según Olofsdotter (2001, citado en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004) han sido determinados los *loci* con características cuantitativas (QTL) correlacionados con la alelopatía.

(La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Importancia de la alelopatía en la obtención de nuevas variedades, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

Respecto a su importancia ecológica

Kil-Ung & Dong-Kyun (2004) destaca que: **“En todos los ecosistemas de arroz los herbicidas se han convertido en uno de los más importantes componentes de control de malezas”**. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Importancia de la alelopatía en la obtención de nuevas variedades, Importancia ecológica, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

Respecto a su importancia económica

Kil-Ung & Dong-Kyun (2004) nos explica que: **“El uso de cultivos alelopáticos puede reducir definitivamente el costo del control de malezas”**. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Importancia de la alelopatía en la obtención de nuevas variedades, Importancia económica, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

4. Caracteres Alelopáticos

Para explicarnos que son los caracteres alelopáticos, Minotti y Sweet (1981) y Bekowitz (1988) (ambos citados en FAO | Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004), las definen señalado que:

Son características morfológicas tales como rápida emergencia y vigor de las plántulas, rápida tasa de crecimiento que produce un denso dosel foliar, mayor altura de las plantas, mayor volumen de raíces y mayor duración del crecimiento, que aumentan la capacidad de los cultivares de arroz para competir con las malezas. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Caracteres alelopáticos, párrafo 1). (La negrita es nuestra).

5. Tipos de Control Alelopático

Al respecto, en la Biblioteca Química.es (s/f) se explica lo siguiente:

El control orgánico con plantas se ha utilizado desde hace mucho tiempo y su funcionamiento se basa en repeler y atraer insectos, gusanos y agentes vectores de enfermedades. Las plantas que se usan para estos fines son las hortalizas, las hierbas aromáticas, plantas medicinales y las mal llamadas “malezas”. (Tipos de control alelopático, párrafo 1).

6. Asociación de cultivos por principios alelopáticos

De acuerdo con la Enciclopedia Química.es (s/f) los tipos de control que se usan con frecuencia en alelopatía, se hacen con:

a) Plantas Acompañantes

... se refiere al uso de plantas por medio de las cuales los cultivos se encuentran en combinación exitosa con otras plantas, para proporcionarles un beneficio mutuo, incluyendo el hecho de proporcionar una esencia aromática a la atmósfera cuando están sembradas entre los vegetales y en menor proporción cuando están en los bordes o al final de los surcos.

Por ejemplo, **la ortiga (wikispecies: *Urtica urens* L.) sembrada cerca de cualquier planta aromática le aumenta la pungencia y el aroma; específicamente, al lado de la yerbabuena le incrementa el doble la cantidad de aceite esencial; la achilea, milenrama o colchón de pobre (wikispecies: *Achilea millefolium*) también incrementa la calidad aromática de todas las hierbas que crecen junto a ellas.**

Otra forma como las hierbas pueden ayudar a contribuir y a mantener buenos huertos es, controlando orgánica y biológicamente tanto enfermedades como insectos plaga. Como expusimos anteriormente, aquí prevenir es mejor que curar.

No solamente plantas individuales, sino todo el cultivo puede llegar a enfermar a través de prácticas de monocultivo, pues la naturaleza por sí misma nunca produce una sola clase de plantas en un área, por esto, este tipo de práctica no es recomendable.

Usualmente, la mayor variación es mejor si en general se desarrolla un paisaje de jardín, en donde si todas crecen juntas se proporcionan un mutuo beneficio. Las razones de estos beneficios mutuos son la exudación de raíces, hojas y flores o residuos de plantas, cuyas emanaciones son absorbidas de una planta a otra por conexiones que mediante equilibrio natural se establecen, pero que el hombre sin querer ha perturbado.

b) Plantas Repelentes

... son plantas de aroma fuerte para mantener alejados los insectos de los cultivos. Este tipo de plantas protegen los cultivos hasta 10 metros de distancia, algunas repelen un insecto específico y otras varias plagas.

Generalmente, las plantas repelentes se siembran bordeando los extremos de cada surco del cultivo o alrededor del cultivo para ejercer una barrera protectora. Desde tiempos remotos gran variedad de hierbas aromáticas se han plantado en los bordes o en pequeñas áreas de los cultivos de vegetales, conociéndose los beneficios que brindan a la mayoría de las plantas.

La única excepción a la regla es el hinojo (wikispecies: *Foeniculum vulgare*), el cual genera efectos adversos en

muchas plantas. Todas las plantas aromáticas ejercen una influencia sobre sus plantas vecinas. Es importante notar que, en su mayoría, las plantas acompañantes además de crear un beneficio mutuo, también ejercen una acción repelente.

c) Plantas Trampa

El último tipo de control alelopático es el empleo de Cultivos Trampa, en donde algunos agricultores acostumbran **usar plantas que son altamente atractivas para los insectos y los desvían de los cultivos principales hacia ella**. Estas plantas pueden ser sembradas alrededor de los surcos o entre ellos de modo que las plagas que allí se junten puedan ser atrapadas y eliminadas fácilmente. Los cultivos trampa pueden servir como lugares de reproducción para parásitos y depredadores de las plagas...

(Tipos de Control Alelopáticos, párrafos 1-11) (La negrita es nuestra).

7. Variabilidad Genética

De acuerdo con la CONABIO (2025):

La variabilidad genética es una medida de la tendencia de los genotipos de una población a diferenciarse. Los individuos de una misma especie no son idénticos. Si bien, son reconocibles como pertenecientes a la misma especie, existen muchas diferencias en su forma, función y comportamiento. En cada una de las características que podamos nombrar de un organismo existirán variaciones dentro de la especie. Por ejemplo, los jaguares del pantanal en Brasil son casi del doble del tamaño (100 kilos) que los jaguares mexicanos (entre 30 y 50 kilos) y sin embargo son la misma especie (*Panthera onca*).

Gran parte de la variación en los individuos proviene de los genes, es decir, es variabilidad genética. **La variabilidad genética se origina por mutaciones, recombinaciones y alteraciones en el cariotipo (el número, forma, tamaño y ordenación interna de los cromosomas). Los procesos que dirigen o eliminan variabilidad genética son la selección natural y la deriva genética.**

La variabilidad genética permite la evolución de las especies, ya que en cada generación solamente una fracción de la población sobrevive y

se reproduce transmitiendo características particulares a su progenie. (Variabilidad Genética, párrafo 1, 3-4) (La negrita es nuestra).

7.1 Análisis de los loci de características cuantitativas

Según nos comentan Kil-Ung & Dong-Kyun (2004):

Hasta hace poco tiempo muchos estudios verificaron los mecanismos de un sistema de autodefensa, incluyendo la aleopatía en las plantas, especialmente referida al metabolismo de fenilpropanoides ... e isoterpenoides ... **Las plantas responden al estrés ambiental por medio de una variedad de reacciones bioquímicas que pueden proporcionar protección contra los agentes causantes. El incremento de compuestos fenólicos y terpenoides alelopáticos bajo condiciones de estreses ambientales ha sido bien documentado.** (Variabilidad genética, Análisis de los *loci* de características cuantitativas). (La negrita es nuestra).

Hahlbrock y Scheel, 1989; Ballare *et al.*, 1995; Tevini *et al.*, 1991; Liu *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2000 (todos ellos citados en Kil-Ung & Dong-Kyun, 2004) señalan que: “Por ejemplo, **un fortalecimiento de la luz UV-B induce la acumulación de fenilpropanoides y flavonoides en diferentes especies tales como frijoles, perejil, papa, tomate, maíz, centeno, cebada y arroz**”. (Variabilidad genética, Análisis de los *loci* de características cuantitativas). (La negrita es nuestra).

7.2 Procesos para la síntesis de compuestos aleloquímicos

Kil-Ung & Dong-Kyun (2004), nos explican que:

Todos los fenilpropanoides son derivados del ácido cinnámico el cual es formado a partir de la fenilalanina por acción catalítica de la fenilalanina amioniliasa (PAL), la enzima ramificada entre el metabolismo primario (proceso «shikimate») y secundario (fenilpropanoide)... **Sesabe que muchos compuestos fenólicos no** tienen solamente una capacidad fisiológica funcional sino también potencial alelopático para las plantas. (Procesos para la síntesis de compuestos aleloquímicos, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Gershenzon y Croteau (1993, citados en KilUng & DongKyun, 2004) nos explican que: “Los compuestos isoprenoides son producidos a partir de unidades isoprenoides C_5 y la clasificación de las diferentes familias de isoprenoides está basada en el número de unidades de isoprenoides C_5 presentes en el esqueleto de los compuestos”. (Variabilidad genética, Procesos para la síntesis de compuestos aleloquímicos, párrafo 2).

Por su parte, Kil-Ung & Dong-Kyun (2004), detallan que:

En particular, **los diterpenoides son conocidos por la función importante que tienen en los mecanismos de autodefensa del arroz, así como por el potencial alelopático. Los terpenoides tienen distintas funciones en las plantas como hormonas (giberelinas, ácido abscísico), pigmentos fotosintéticos (fitol, carotenoides), transportadores de electrones (ubiquinona, plastofatos), mediadores de la unión de polisacáridos (fosfatos de poliprenilo) y componentes estructurales de las membranas (fitosteroles). Además de las funciones universales fisiológicas, metabólicas y estructurales muchos compuestos terpenoides específicos (comúnmente en las familias C_{10} , C_{15} y C_{20}) sirven para la comunicación y la defensa. Se ha determinado que terpenoides específicos inducidos han sido correlacionados con interacciones planta-planta, planta-insecto y planta- patógeno.** (Variabilidad genética, Procesos para la síntesis de compuestos aleloquímicos, párrafo 2). (La negrita es nuestra).

8. Estrategias para el fitomejoramiento de cultivos alelopáticos

Respecto al fitomejoramiento tradicional, Kil-Ung & Dong-Kyun (2004) nos comenta que:

A pesar de la influencia de la biotecnología y de la ingeniería genética para cambiar los futuros métodos de producción para la obtención de nuevas variedades, la investigación en **el fitomejoramiento tradicional cumplirá una importante función en los futuros programas de mejoramiento varietal. Un posterior refinamiento de estos métodos y un mejor conocimiento del conocimiento clásico son un prerequisite para el uso racional de nuevas herramientas**

tales como los marcadores moleculares. (La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivares, Estrategias para el fitomejoramiento de cultivos alelopáticos, Fitomejoramiento tradicional, párrafo 5). (La negrita es nuestra).

9. Conclusiones

Kil-Ung & Dong-Kyun (2004) concluyen que:

El mejoramiento del potencial alelopático de las variedades cultivadas tendrá un gran impacto sobre los sistemas de producción agrícola, tanto en aquellos sistemas de bajos insumos como en los de altos insumos. Es poco probable que la alelopatía por si sola puede reemplazar totalmente a otras prácticas de control de malezas ya que su efectividad es influenciada por muchos factores. Sin embargo, una reducción del uso de los herbicidas será un beneficio para los agricultores y también reducirá el impacto en el ambiente.

...se ha hecho un progreso importante en los métodos de selección, identificación de compuestos alelo químicos específicos y genes relacionados que pueden ser utilizables en programas de fitomejoramiento. Si son identificados los compuestos aleloquímicos y los genes responsables por los efectos alelopáticos, estos caracteres pueden ser fácilmente incorporados en los cultivares mejorados por medio de técnicas de fitomejoramiento disponibles en la actualidad.

De cualquier manera, se asume que la obtención de nuevos cultivares alelopáticos representará una atracción interesante para satisfacer la demanda de los consumidores y los ambientalistas. **Un enfoque de equipo multidisciplinario que abarque un amplio grupo de científicos, incluyendo investigadores sobre malezas, ecólogos, químicos de productos naturales, fitomejoradores y biólogos moleculares** podría contribuir a satisfacer el objetivo de obtener cultivares alelopáticos. Estudios adicionales sobre la identificación de compuestos aleloquímicos específicos y sobre los genes responsables por la alelopatía podrán arrojar luz sobre los métodos fitotécnicos adecuados para el desarrollo de cultivares alelopáticos. (Conclusiones) (La negrita es nuestra).

Anexo 1

Vídeo sobre la Alelopatía y la Comunicación de las Plantas

DOCUMENTO	CONTENIDO
Cómo se comunican las plantas. Fuente: Ecología Verde	Un fenómeno que muchas personas desconocen es que los organismos cercanos tienen la capacidad de comunicarse o interactuar entre ellos mediante compuestos químicos. Esto es lo que se denomina como alelopatía y, por ejemplo, un caso muy sencillo es la relación entre las plantas cercanas entre sí en un huerto. A esto se le conoce como asociación de cultivos y también sirve para el control orgánico de plagas en las plantas.
Link: https://youtu.be/w56J2mxw8Io	



PLANTAS DE RESURRECCIÓN

La Seguridad Alimentaria es un desafío crítico para los próximos años, y las plantas de resurrección, pueden ser la solución, dada su capacidad para sobrevivir a la deshidratación extrema y luego reanudar sus actividades fisiológicas normales al volver a hidratarse. El reto estaría en transformar una planta tradicional en una de resurrección

Plantas de Resurrección

1. Introducción

En una presentación, en TED Global, la bióloga Jill Farrant (2015) destacaba lo siguiente:

[00:04] **Creo que el secreto para producir cultivos resistentes a la sequía, que debemos lograr para dar seguridad alimentaria al mundo, reside en las plantas de resurrección.**

[00:29] ¿Por qué sugiero que la producción de cultivos tolerantes a la sequía brindaría seguridad alimentaria? La población mundial actual es de alrededor de 7 mil millones. Y se estima que para el año 2050, vamos a ser entre 9 y 10 mil millones de personas, con la mayor tasa de crecimiento en África.

[00:49] Las organizaciones agrícolas de alimentos del mundo han sugerido que es necesario un aumento del 70% en la producción agrícola actual para satisfacer esa demanda. Ya que las plantas están en la base de la cadena alimentaria, la mayor parte tendrá que venir de las plantas.

[01:04] **Ese porcentaje del 70 % no tiene en cuenta los posibles efectos del cambio climático.**

[01:11] **Esto está tomado de un estudio realizado por Development Alternatives Inc (DAI), publicado en 2011, donde tomó en consideración todos los efectos potenciales del cambio climático y señaló, entre otras cosas el aumento de la aridez debido a la sequía o lluvia poco frecuente.**

[01:59] Hacer cultivos tolerantes a la sequía no es cosa fácil. Y la razón es el agua. El agua es esencial para la vida en este planeta. Todos los organismos vivos que metabolizan desde los microbios hasta tú y yo, estamos compuestos predominantemente de agua. Todas las reacciones de la vida suceden en el agua. Y la pérdida de una pequeña cantidad de agua resulta en la muerte. Tú y yo somos 65% agua, si perdemos un 1%, morimos. Pero podemos cambiar nuestro comportamiento para evitarlo. **Las plantas no pueden. Están atrapados en el suelo. Por eso tienen un poco más de agua que nosotros, casi un 95 % de agua, y pueden perder un poco más que nosotros, entre 10 %**

y 70 %, dependiendo de la especie, pero por periodos cortos solamente.

[02:48] La mayoría tratarán de resistir o evitar la pérdida de agua. Ejemplos extremos los podemos encontrar en plantas suculentas. Tienden a ser pequeñas, muy atractivas, pero se aferran a su agua a tan alto costo que crecen muy lentamente. **Los árboles y arbustos evitan la pérdida de agua. Envían raíces muy profundas, minan suministros de agua subterráneos y mantienen el flujo en todo momento, manteniéndose hidratados.**

[12:05] Para el enfoque final. Mi investigación ha demostrado que **hay una considerable similitud en los mecanismos de tolerancia a la desecación en semillas y plantas de resurrección.** Así que me hice la pregunta, ¿utilizan los mismos genes? O parafraseado, **¿las plantas de resurrección evolucionaron semillas con genes tolerantes a la desecación en sus raíces y hojas? ¿Han reasignado la tarea de estos genes de semillas en las raíces y las hojas de las plantas de resurrección?**

[12:31] **Y respondo a esa pregunta, gracias a una gran cantidad de investigación de mi grupo y recientes colaboraciones de un grupo de Henk Hilhorst en los Países Bajos, Mel Oliver en los Estados Unidos y Julia Buitink en Francia. La respuesta es sí, hay un conjunto básico de genes que están involucrados en ambos. (Transcripción vídeo conferencia TED)**

Respecto a las plantas de resurrección, Oliver MJ, Farrant JM, Hilhorst HWM, et al. (2020, citados en Tsanko Gechev, et al., 2021) señalan que:

Las plantas de resurrección son un grupo único de especies que pueden sobrevivir a la deshidratación a un estado seco al aire durante meses, perdiendo la mayor parte de su agua celular y reanudando rápidamente sus actividades fisiológicas normales después de la rehidratación. (Introducción, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Oliver MJ, Farrant JM, Hilhorst HWM, et al. (2020) y Gechev TS, Dinakar C, Benina M, et al. (2012) (citados ambos en Tsanko Gechev, et al., 2021), nos explican que: **“El término ‘plantas de resurrección’**

se usa con más frecuencia para describir las especies tolerantes a la desecación vascular, pero este fenotipo se puede observar en todas las plantas verdes". (Introducción, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Griffiths CA, Gaff DF, Neale AD (2014, citados en Tsanko Gechev, et al., 2021) nos comentan que:

Se ha desarrollado un sistema de protección altamente eficiente en estas especies para lidiar con el daño irreversible inducido por la deshidratación que ocurre en las plantas sensibles a la desecación. La sequía puede desencadenar una senescencia prematura en especies sensibles, lo que normalmente no ocurre en las plantas de resurrección. (Introducción, párrafo 1).

Gechev TS, Dinakar C, Benina M, et al. (2012) y Males J. (2017) (citados ambos en Tsanko Gechev, et al., 2021), nos explican que:

La estrategia de tolerancia a la desecación vegetativa (VDT) utilizada por las especies de resurrección para sobrevivir a la deficiencia de agua es fundamentalmente diferente de la empleada por las suculentas y las plantas efímeras, que enfrentan la sequía manteniendo un alto potencial hídrico y evitando los períodos de sequía, respectivamente. (Introducción, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Oliver MJ, Farrant JM, Hilhorst HWM, et al. (2020) y Lyall R, Gechev T. (2020) (citados ambos en Tsanko Gechev, et al., 2021), nos precisan que:

Aunque las plantas de resurrección son un grupo relativamente pequeño, exhiben una amplia diversidad taxonómica, ecológica y geográfica (ver Figura 11). Las especies tolerantes a la desecación comprenden algas, musgos, helechos y licopodos, así como plantas angiospermas (tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas), pero no en gimnospermas. (Introducción, párrafo 2) (La negrita es nuestra).

Oliver MJ, Velten J, Mishler BD. (2005) y Porembski S. (2011) (citados ambos en Tsanko Gechev, et al., 2021), nos detallan que: **"Se han descrito alrededor de 300 plantas de resurrección angiospermas que evolucionan independientemente en al menos 13 linajes diferentes que representan menos del 0,2% de la flora total"**. (Introducción, párrafo 2) (La negrita es nuestra).

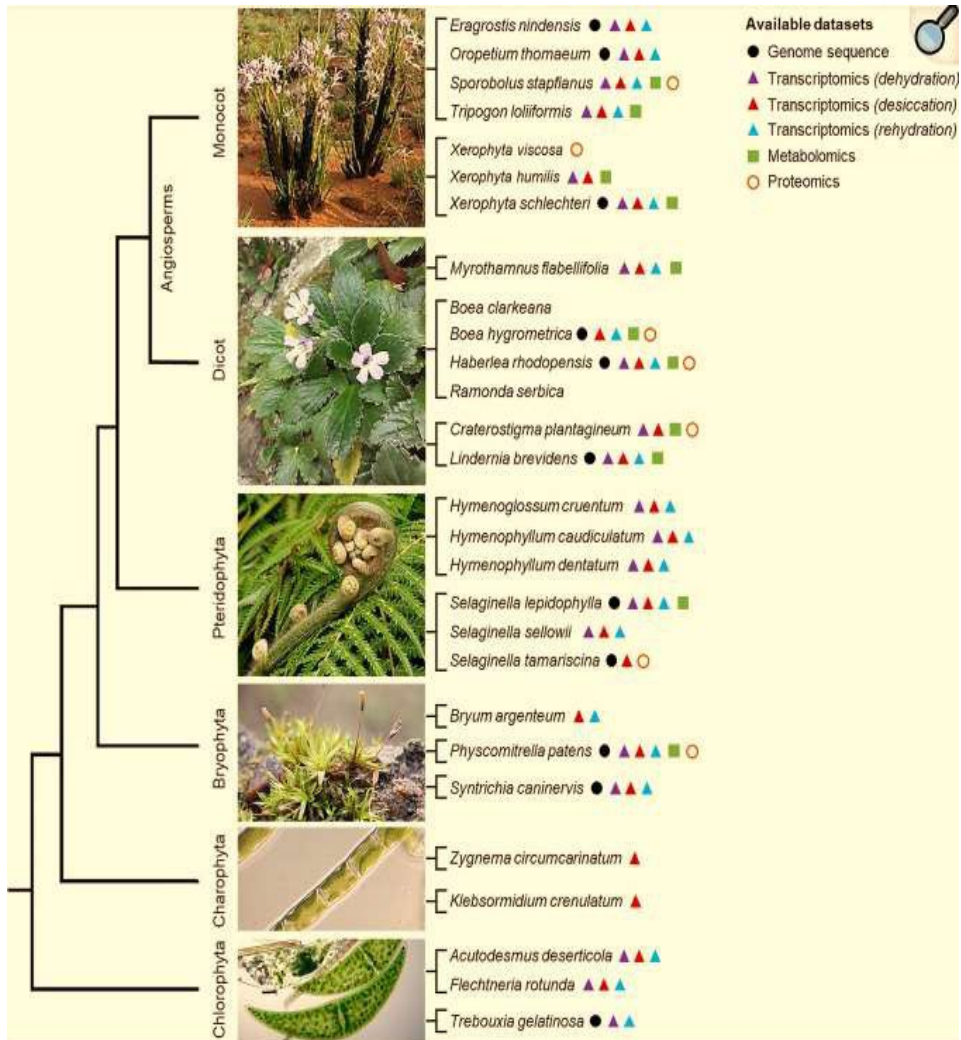


Figura 11. Resumen de los conjuntos de datos experimentales de nueva generación disponibles para las especies de resurrección. La relación entre los linajes de plantas terrestres se muestra en forma de árbol. Los símbolos junto a cada especie indican la disponibilidad de datos publicados: genoma (círculos negros), datos de expresión génica (triángulos de colores) y/o datos metabolómicos (cuadrados verdes). Las plantas vasculares (pteridofitas y angiospermas) son las especies tolerantes a la desecación más investigadas, aunque este rasgo es más común en las no traqueofitas. No obstante, los datos experimentales para estas especies se limitan actualmente a unas pocas familias (indicadas por las puntas de las ramas agrupadas): Poaceae y Velloziaceae (monocotiledóneas), Myrothamnaceae, Gesneriaceae y Linderniaceae (dicotiledóneas), e Hymenophyllaceae y Selaginellaceae (helechos y licofitas). Fuente: Oliver MJ, Farrant JM, Hilhorst HWM, et al. (2020).

Oliver MJ, Farrant JM, Hilhorst HWM, et al. (2020) y Phillips JR, Fischer E, Baron M, et al. (2008) (citados ambos en Tsanko Gechev, et al., 2021), distinguen que:

Aunque la mayoría de las plantas de resurrección se encuentran en hábitats con períodos secos estacionales, algunas especies se encuentran en áreas donde la sequía no es un estrés común. La especie *Lindernia brevidens*, por ejemplo, crece incluso en selvas tropicales que carecen de un período seco. (Introducción, párrafo 2) (La negrita es nuestra).

Oliver MJ, Farrant JM, Hilhorst HWM, et al. (2020, citados en Tsanko Gechev, et al., 2021), precisan que: **“Geográficamente, las especies de resurrección se encuentran en casi todos los continentes (África, Australia, Asia, Europa, América). África, especialmente el sur de África, es particularmente rica en especies de resurrección”.** (Introducción, párrafo 2).

2. Las Plantas de Resurrección

En un artículo reciente del periodista Joaquín Bahamonde (2025) se recoge una investigación científica que señala que:

Científicos de diferentes partes del mundo estudian las capacidades extraordinarias de ejemplares capaces de sobrevivir meses sin agua”.

En el mundo vegetal, las “plantas de resurrección” representan una minoría fascinante dentro del vasto universo de las angiospermas. Según la BBC Mundo, estas plantas poseen un sistema notable que les permite entrar en un estado de latencia durante largos periodos de sequía, volviendo a la vida en cuestión de horas tras recibir agua.

La increíble capacidad de ciertas plantas para sobrevivir largas sequías muestra un potencial transformador para la agricultura en un clima cambiante.

Este fenómeno, que desafía las leyes comunes de la biología vegetal, capturó la atención de científicos preocupados por los desafíos climáticos actuales. (subtítulo, párrafos 1-2 y leyenda de imagen con créditos de Freepik) (La negrita es nuestra).

Esa misma preocupación la comparto y me conduce a recoger lo señalado en este artículo, destacando la excepcional resistencia de estas plantas, tal y como nos reporta la publicación de Bahamonde (2025):

Las plantas de resurrección son notablemente raras, con solo 240 especies documentadas dentro de las 352.000 especies conocidas de plantas con flores. Tal como detalló BBC Mundo, estas plantas evolucionaron para tolerar condiciones extremas.

Crecen principalmente en regiones de Sudáfrica, Australia y Sudamérica, y cada especie, a pesar de su diversidad, desarrolló de manera independiente la capacidad de sobrevivir sin agua.

Algunas plantas desafían las condiciones climáticas extremas al adaptarse de manera única, manteniéndose vivas sin agua durante periodos prolongados (Resistencia excepcional, párrafos 1-2 y leyenda de imagen con créditos de Freepik) (La negrita es nuestra).

Bahamonde (2025), reporta que los estudios de investigación fueron obra de un equipo liderado por:

Jill Farrant, profesora en el área de tolerancia a la desecación en la Universidad de Ciudad del Cabo, (quien) dedicó más de tres décadas al estudio de estas plantas. (Estudios de investigación, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Bahamonde nos presenta un conjunto de posibilidades que se inauguran, al comentar que:

Según el medio británico, Farrant y otros expertos **consideran que los mecanismos genéticos subyacentes en estas especies podrían significar un cambio de paradigma en el manejo de cultivos agrícolas frente al cambio climático.**

Las plantas convencionales suelen morir si pierden entre el 10 y el 30% de su contenido de agua. Sin embargo, las plantas de resurrección pueden soportar una pérdida de más del 95%.

Esta capacidad, además de su impresionante recuperación post-sequía, las distingue y ofrece un prometedor modelo a considerar en la investigación agronómica. (Estudios de investigación, párrafo 2-4) (La negrita es nuestra).

El artículo nos explica los mecanismos de supervivencia al señalarnos que:

Estas plantas utilizan un proceso llamado vitrificación para

soportar la deshidratación extrema. Este mecanismo, según lo explicado por la BBC Mundo, consiste en reemplazar el agua perdida con azúcares tales como la sacarosa, formando una sustancia similar al vidrio que preserva la estructura celular y ralentiza las reacciones químicas.

Fenómenos similares se observan en organismos como los tardígrados, prueba de la increíble capacidad adaptativa de la naturaleza. (Bahamonde, 2025, Mecanismos de supervivencia, párrafo 1-2) (La negrita es nuestra).

En su artículo, Bahamonde (2025) refiere información recogida por la BBC respecto al Impacto del cambio climático, destacando que:

El artículo de la BBC señala que el problema **del aumento de sequías está agravado por el calentamiento global.**

Según el científico retirado **Henk Hilhorst**, el futuro podría ver regiones actualmente fértiles **volverse estériles**, con limitadas tierras agrícolas viables al norte del planeta.

La creciente severidad de las sequías vinculada al cambio climático plantea desafíos enormes para la producción agrícola global. (Impacto del cambio climático, párrafos 1-2 y leyenda de imagen con créditos de EFE/Gustavo Amador) (La negrita es nuestra).

Respecto a sus aplicaciones en el campo agrícola, Bahamonde (2025) nos refiere lo siguiente:

Farrant sugiere que: la mera selección de características naturales latentes en las semillas podría amplificar la resistencia de los cultivos a la sequía, sin necesidad de introducir ADN de otras especies.

La activación de genes comúnmente presentes en semillas podría potencialmente permitir a plantas maduras soportar periodos de desecación, posiblemente mitigando la controversia alrededor de los cultivos transgénicos. (Futuras aplicaciones agrícolas, párrafo 1-2) (La negrita es nuestra).

Finalmente, el artículo de Bahamonde (2025) expone los avances en la investigación y desarrollo de esta iniciativa, destacando lo siguiente:

El caso del teff, un cereal promovido por su tolerancia a la sequía, sobresale en esta investigación. Tiene un pariente cercano en el

mundo de las plantas de resurrección: *Eragrostis nindensis*. La comparación entre estas especies podría esclarecer qué genes se desactivaron y facilitar su reintroducción en el teff, aseguró la BBC.

Tal como lo indica el artículo, comprender mejor estos mecanismos genéticos podría abrir la puerta a variedades de cultivos más sostenibles, incluso si el rendimiento disminuye ligeramente. “Puede que tengan un rendimiento bajo, pero el agricultor de subsistencia tiene un cultivo”, comentó Farrant a BBC Mundo.

El potencial de las plantas de resurrección para inspirar nuevas prácticas agrícolas en respuesta al cambio climático es innegable. Seguir explorando sus capacidades y cómo integrarlas en cultivos básicos podría representar un avance crucial para asegurar la seguridad alimentaria global ante un clima cada vez más impredecible. (Investigación y desarrollo, párrafos 1-3).

Anexo 1

Vídeos sobre las Plantas de Resurrección

DOCUMENTO	CONTENIDO
Cómo podemos hacer cultivos que sobrevivan sin agua. Fuente: TED Takeaways	Conforme la población mundial crezca y los efectos del cambio climático cobren mayor relieve, vamos a tener que alimentar a más personas utilizando menos tierra cultivable. La bióloga molecular Jill Farrant estudia un fenómeno peculiar que puede ayudar: “Las plantas de resurrección”, plantas muy resistentes que aparentemente reviven de entre los muertos. ¿Podrían tener la solución para el cultivo de alimentos en un mundo más caliente y seco?
Link: https://www.ted.com/talks/jill_farrant_how_we_can_make_crops_survive_without_water/transcript?language=es&subtitle=es	

Anexo 2

Recopilación ampliada y actualizada de Estudios Científicos sobre las llamadas Plantas de Resurrección

Detallamos a continuación una recopilación **ampliada y actualizada** de estudios científicos sobre plantas con capacidad de “hibernación” durante sequías prolongadas (plantas de resurrección), incluyendo enlaces a artículos y recursos disponibles en línea:

1. Especies clave y estudios destacados

1.1 *Selaginella lepidophylla*

▪ Estudio seminal:

- **Título:** “New desiccation-tolerant plants, including a grass, in the central highlands of Mexico, accumulate trehalose” (Iturriaga et al., 2000).
- **Hallazgos:** Demuestra la acumulación de trehalosa como mecanismo protector durante la desecación.
- **Enlace:** Australian Journal of Botany

▪ Mecanismos moleculares:

- **Título:** “The role of trehalose in the resurrection plant *Selaginella lepidophylla*” (Yobi et al., 2013).
- **Revista:** *Plant, Cell & Environment*.
- **Enlace:** PubMed

1.2 *Myrothamnus flabellifolia*

▪ Resistencia a sequía y frío:

- **Título:** “Desiccation tolerance in the resurrection plant *Myrothamnus flabellifolia*” (Moore et al., 2007).
- **Revista:** *Plant Signaling & Behavior*.
- **Enlace:** Taylor & Francis

▪ Proteínas LEA:

- **Título:** “LEA proteins and drought survival in *Myrothamnus flabellifolia*” (Illing et al., 2005).
- **Revista:** *Plant Physiology*.
- **Enlace:** APS Journals

1.3 *Craterostigma plantagineum*

- **Genómica:**
 - **Título:** “Transcriptional profiling of desiccation tolerance in *Craterostigma plantagineum*” (Bartels et al., 1990).
 - **Revista:** *Planta*.
 - **Enlace:** Springer
- **Genes de resistencia:**
 - **Título:** “The resurrection plant *Craterostigma plantagineum*: A model for studying desiccation tolerance” (Farrant et al., 2007).
 - **Revista:** *Trends in Plant Science*.
 - **Enlace:** Cell Press

1.4 *Xerophyta viscosa*

- **Reparación del ADN:**
 - **Título:** “Mechanisms of desiccation tolerance in *Xerophyta viscosa*” (Farrant et al., 2015).
 - **Revista:** *Journal of Experimental Botany*.
 - **Enlace:** Oxford Academic
- **Genoma secuenciado:**
 - **Título:** “The *Xerophyta viscosa* genome reveals genetic adaptations to desiccation” (Costa et al., 2017).
 - **Revista:** *Nature Plants*.
 - **Enlace:** Nature

2. Mecanismos comunes de resistencia

2.1 Trehalosa

- **Función:** Estabiliza membranas y proteínas durante la deshidratación.
- **Estudio clave:** “Trehalose and plant stress responses: friend or foe?” (Fernández et al., 2010).
- **Enlace:** ScienceDirect

2.2 Proteínas LEA (Late Embryogenesis Abundant)

- **Protección celular:**
 - **Revisión:** “LEA proteins: Versatility of form and function” (Hinch & Thalhammer, 2012).
 - **Enlace:** Frontiers in Plant Science

2.3 Antioxidantes

▪ Eliminación de ROS:

- **Título:** “Antioxidant systems in resurrection plants” (Kranner et al., 2002).
- **Revista:** *Physiologia Plantarum*.
- **Enlace:** Wiley

3. Aplicaciones biotecnológicas

3.1 Transferencia de genes a cultivos:

- **Título:** “Engineering drought tolerance in crops using resurrection plant genes” (Gaff & Oliver, 2013).
- **Revista:** *Plant Biotechnology Journal*.
- **Enlace:** Wiley

3.2 Caso de éxito

- **Título:** “Expression of a resurrection plant LEA protein in rice improves drought resistance” (Duan et al., 2019).
- **Revista:** *Plant Molecular Biology*.
- **Enlace:** Springer

4. Recursos adicionales

4.1 Bases de datos y repositorios

- **Dryad:** Datos genómicos de plantas de resurrección.
 - <https://datadryad.org/>
- **Phytozome:** Genomas de plantas tolerantes a sequía.
 - <https://phytozome.jgi.doe.gov/>

4.2 Libros

- **“Desiccation Tolerance in Plants”** (Alpert & Oliver, 2002).
 - <https://www.cabdigitallibrary.org/doi/10.1079/9780851995342.0003>

5. Especies menos conocidas

5.1 *Ramonda serbica* (Planta de los Balcanes):

- **Título:** “Desiccation tolerance in *Ramonda serbica*” (Rakić et al., 2009).
- **Revista:** *Plant Ecology*.
- **Enlace:** Springer

5.2 *Haberlea rhodopensis* (Planta de los Balcanes):

- **Título:** “Transcriptomic insights into the desiccation tolerance of *Haberlea rhodopensis*” (Gechev et al., 2013).
- **Revista:** *BMC Genomics*.
- **Enlace:** [BMC](#).

Resumen visual

Especie	Mecanismo clave	Aplicación potencial
<i>Selaginella lepidophylla</i>	Trehalosa	Cultivos en zonas áridas
<i>Myrothamnus flabellifolia</i>	Proteínas LEA	Biotecnología agrícola
<i>Craterostigma plantagineum</i>	Reparación del ADN	Ingeniería genética
<i>Xerophyta viscosa</i>	Antioxidantes	Resistencia a estrés múltiple

Acceso a artículos

- **Artículos gratuitos:** Usa plataformas como PubMed Central o arXiv.
- **Artículos pagados:** Solicita copias en ResearchGate o usa servicios institucionales.



LA YARETA DEL ALTIPLANO

Un Tesoro Andino

Arbusto nativo de las regiones altiplánicas, conocido por su apariencia similar al musgo. Es una de las plantas más longevas, alcanzando los 3.000 años o más y, lamentablemente, se encuentra en estado vulnerable.

¿Cuáles son sus principales características y amenazas?

¡Descúbrelo aquí!

Llareta, Yareta o Azorella

1. Introducción

Según F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro (2012):

La yareta (*Azorella compacta* Phil.), **es una especie que habita desde los 4,000 a 4,800 m.s.n.m, formando almohadillas compactas que llegan a alcanzar hasta 1.20 m de alto y 2.50 m de cobertura en el Perú.** Florece en las estaciones de primavera y verano en suelos húmedos y fríos.

Es una especie resinosa, que crece en condiciones de clima muy riguroso y siempre se la encuentra por encima de los 4,000 m.s.n.m. en la alta cordillera altiplánica del Sur del Perú hasta el Norte de Chile y las regiones limítrofes de Bolivia. (Introducción, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Loyola, et al. (1997, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012) destacan que: “La importancia etnobotánica radica **en las propiedades y usos que le atribuyen en la etnomedicina, para el tratamiento de la diabetes, el asma, bronquitis y enfermedades renales a través de infusiones preparadas con las raíces de sabor muy amargo**”. (Introducción, párrafo 2) (La negrita es nuestra); mientras que Cáceres (2003), Linares (2000) y Rodríguez (2000) (todos ellos citados en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012) destacan su uso: “**...para el reumatismo y contusiones de la piel a través del uso de la resina como emplastos**”. (Introducción, párrafo 2) (La negrita es nuestra); o como destaca Soukup (1970, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): “como combustible para la cocina y para fundición de minerales”. (Introducción, párrafo 2).

Respecto a su ecología, F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro (2012) nos detallan que:

Es una especie siempre verde y perenne, y tiene polinización entomófila, polinizada por insectos. Se menciona también que es una especie auto fértil. Prefiere suelo arenoso liviano, y bien drenado. **Crece en medios nutricionalmente pobres, no importando si son ácidos, neutro o básico (alcalino).** Está bien adaptado a insolación alta típica de las alturas, no crece a la sombra. Crece en matas

bien densas, para reducir pérdidas de calor, y muy cerca del suelo donde las temperaturas del aire son de 1 o 2 °C más altas que las del aire, debido a que la radiación de onda larga re irradiada por el suelo (que es usualmente negro grisáceo a negro, en la Puna).

Se considera una planta caméfito, densamente compacta que comprende numerosos tallos y hojas; los tallos que van muriendo forman una especie de relleno (detritus) dentro del cuerpo del cojín por lo que es sólido y la planta se ve de color verde durante todo el año. Las hojas en descomposición ayudan en la formación del suelo. (Ecología, párrafos 1-2) (La negrita es nuestra).

Con respecto a su habitat, F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro (2012) nos explica que es un: “**Género con muchas especies en Perú, *A. compacta*** Phil. habita en la alta cordillera de Perú, Argentina, Bolivia y Chile. En el Perú crece formando grandes comunidades en suelos arenosos, arcillosos, pedregosos y laderas con pendientes rocosas”. (Hábitat, párrafos 1-2) (La negrita es nuestra).

Según Linares, 1991; Cáceres, 2003; y Urrunaga R., 2000 (todos citados en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): “En La Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca (RNSAB) se le encuentra formando comunidades a partir de los 4,000 a 4,800 m.s.n.m., en el extremo altitudinal superior de la reserva”. (Hábitat, párrafo 2).

Según Martínez (1989, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): “En otros países como Chile, Bolivia o Argentina crece en laderas y portezuelos de montañas altas, en pedregales y roqueríos hasta los 5,200 m.s.n.m.”. (Hábitat, párrafos 1-3).

En un artículo de Verónica Droppelmann A. (2018) se detalla que:

La llareta, yareta o Azorella compacta es un arbusto nativo de las regiones altiplánicas, conocido por su apariencia similar al musgo. **Es una de las plantas más longevas, alcanzando los 3,000 años o más.**

...Sólo son capaces de crecer 1,5 cm al año. **Eso hace que las especies más grandes, que miden entre medio metro a un metro, puedan llegar a tener cientos o miles de años.** De hecho, la fotógrafa Rachel Sussman incluyó a una yareta de 3.000 años encontrada en el desierto de Atacama en su libro de las especies más longevas del mundo.

También se trata de una especie que puede adaptarse a los cambios extremos de temperatura de la zona y tiene propiedades que la han llevado a ser extraída de forma desmedida y, por lo mismo, ahora está amenazada.

Las llaretas, por su contextura, además funcionan como ingenieros ecosistémicos: pueden reducir la velocidad del viento y controlar las diferencias de temperatura de las zonas en las que habitan. También, como habitan en la alta montaña, pueden adaptarse a suelos que son nutricionalmente pobres con distintos pH, además de sobrevivir en condiciones de sequía, altas y bajas temperaturas y radiación solar. (párrafos 1, 3-4, 8) (La negrita es nuestra).

2. Azorella Compacta

Droppelmann (2018), respecto a la situación de esta especie nos comenta:

Cuando uno va al desierto y ve una yareta (*Azorella compacta*) sin conocerla, puede pensar que es musgo cubriendo piedras; algo que parece un cojín verde. Lo cierto es que es un arbusto que crece entre las piedras y las cubre con sus ramas y vegetación e incluso, **está asociada a vegetales y hierbas como el eneldo, apio, cilantro, zanahoria, hinojo y perejil, ya que pertenecen a la misma familia: *Apiaceae*.**

A lo largo de todo Chile hay cerca de diez tipos de llaretas, pero la más conocida es la del altiplano, esa que habita en alturas entre 3 mil y 5,300 msnm. Adorna los paisajes áridos del desierto nortino, entre las regiones de Arica y Parinacota y de Atacama, con su apariencia de cojín verde y pequeñas flores amarillas (ver figura 12).



Figura 12. Imagen de Yareta (*Azorella compacta*).

Según datos del Ministerio del Medio Ambiente, **esta especie está en estado Vulnerable**. Habitan en una superficie de cercana a los 30 mil km² -lo que equivale a un 30% del desierto de Atacama-, pero en poblaciones muy fragmentadas y frágiles. Además, no hay antecedentes sobre la cantidad de ejemplares de este arbusto ni en qué áreas específicas del altiplano habita, más que en laderas rocosas de la cordillera.

Sin embargo, sí se sabe por qué está amenazada: **la pérdida de hábitat y su captura o extracción**. En los dos siglos pasados hubo una alta explotación de este arbusto, pese a que su extracción empezó, al menos en teoría, a ser regulada en 1941. ¿La razón? Sus propiedades. Entre ellas, **su uso como combustible**, lo que fue aprovechado por habitantes de la zona y el desarrollo de la actividad minera de cobre y salitre. A eso se suman la amenaza de la construcción de ferrocarriles internacionales -entre Arica y la Paz o Antofagasta y Oruro- y sus beneficios medicinales, ya que sirve como **antiparasitario, como medicina contra la tuberculosis y ayuda a la diabetes**.

Pese a esto, hoy la *Azorella compacta* está más protegida. La Ley de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, que se publicó

en 2008, prohíbe la corta, eliminación, destrucción o descepado de individuos y también la alteración de su hábitat. Esto incluye a las especies Vulnerables y las de formación xerofítica, entre las que está la yareta del altiplano. Y su regulación está en manos de CONAF. En caso de incumplirse la ley, las multas van de 2 a 5 UTM por hectárea, dependiendo de la gravedad de la falta. (párrafos 2-3, 5-7) (La negrita es nuestra).

3. *Azorella Compacta* (Phyl)

En el estudio de F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro (2012) sobre la evaluación etnobotánica de la **Yareta en Arequipa** (Reserva Salinas y Aguada Blanca) se detalla el estado de conservación de la *Azorella compacta*, explicando que:

En el extremo altitudinal superior de la reserva entre los 4,500 a 4,800 m.s.n.m. se encuentra la especie *A. compacta*. **Ocupa una superficie de 8,146.16 ha, que representa el 1.8% del total del área de reserva**, en un hábitat de laderas suaves o roquedales hasta quebradas abruptas, con suelos areno-arcillosos, pedregosos hasta rocosos y asociados a *Pycnophyllum molle*, *Werneria paposa*, *Nototriche obcuniata*, *Calamagrostis curvula*, *Belloa longifolia* y *Baccharis buxifolia*. (Estado actual de Conservación, página 17, párrafo 1) (La negrita es nuestra).

Según la Reserva Nacional Salinas y Aguada Blanca (2006, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012) se tiene que:

Azorella compacta, **según el estado de conservación se encuentra en la categoría vulnerable (VU) dentro de la reserva**, de acuerdo con la categorización de Flora amenazada según D.S.Nro.043-2006-AG. y en categoría de extinción (E) de acuerdo a la categorización de Flora por IRECA-U.N.S.A., 2000. (Estado actual de Conservación, página 17, párrafo 2) (La negrita es nuestra).

F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro (2012) destacan en su estudio sus múltiples usos y detallan:

Según Brack, 1999; y Cabrera, 2007 (citados en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): En el Perú *A. compacta* **es usada como desinflamante (anti inflamatoria) utilizando la resina en forma de emplasto sobre las contusiones y golpes en la piel, sin embargo,**

esta resina es usada también para calmar el dolor de muelas masticándola por un tiempo de 5 minutos.

Para dolores del hígado se utiliza las hojas de la yareta en infusión, mientras que para dolores reumáticos se toma la infusión de las hojas; asimismo para desinflamar la próstata en los varones, se toma la infusión de hojas. (Etnomedicina y Etnofarmacología, página 18, párrafos 12) (Le negrita es nuestra)

Según Cabrera (2007, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): “...es muy **buena para disminuir los niveles de glucosa en la sangre utilizando la infusión de las hojas y flores**”. (Etnomedicina y Etnofarmacología, página 18, párrafos 3) (Le negrita es nuestra).

Según Urrunaga (2000, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): “En la RNSAB (Reserva Nacional Salinas y Aguada Blanca) se menciona a **la yareta utilizada como medicina y como combustible en todas las comunidades donde forma parte de un grupo de plantas que conforman el ‘Ccapo’**”. (Etnomedicina y Etnofarmacología, página 18, párrafos 4) (Le negrita es nuestra).

Según Cáceres (2003, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): Otros estudios realizados en la región señalan el uso medicinal para aliviar el dolor y bajar la hinchazón de la espalda; mientras que, Linares, 1991; Cáceres, 2003 (ambos citados en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012) señalan su uso: “...para desinflamar las hinchazones ocasionados en las fracturas, y además que **es tóxico para el ganado**”. (Etnomedicina y Etnofarmacología, párrafo 5).

Según Sotta (2000, citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012): “entre otros usos los tallos y raíces sirven para fertilizar los terrenos y la resina como incienso para matar polillas”. Mientras que, Font Quer, P. (1995 citado en F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012), señala que: “Otra forma de uso va **destinado al fuego ya que la leña es escasa en las comunidades asentadas en dichas altitudes y las ramas apretadas están impregnadas de resina que facilita su combustión**”. (Otros usos de la etnobotánica, página 19, párrafos 12) (La negrita es nuestra).

El estudio concluye que:

En todas las comunidades entrevistadas se hace referencia sobre el uso de la *Azorella compacta* “yareta” como Combustible y como Medicina y

muy raramente como Biocida. Los usos más frecuentes de *A. compacta* “yareta” son para el sistema óseo y muscular específicamente para curar golpes y contusiones, fracturas y problemas de reumatismo, existiendo otros usos, pero en forma esporádica y con restringido conocimiento de algunos pobladores. **La parte que más se usa de *A. compacta* “yareta” es la resina, que se extrae para la elaboración de parches y pomadas para su venta en los mercados de Arequipa.** (F. Cáceres, I. Poma & V. Spadaro, 2012, Conclusiones, página 28, párrafos 1-2).



CIANOBACTERIAS EN HIDROGEL

**Un hidrogel con
cianobacterias podría ser una
solución para combatir el
cambio climático**

Hidrogel con cianobacterias, una solución alternativa para combatir el Cambio Climático

Investigadores de **ETH Zurich** incluyeron cianobacterias dentro de un hidrogel, que es un polímero inerte, y obtuvieron un material vivo artificial. El nuevo material es capaz de capturar dióxido de carbono (CO_2) de manera eficaz, mientras genera minerales que lo almacenan de forma estable.

1. Introducción

En un artículo de la periodista científica Valeria Román (2025) sobre este descubrimiento nos explicaba lo siguiente: “En la misma universidad pública que formó a Albert Einstein en Suiza, un equipo científico desarrolló una innovación inesperada para mejorar la calidad del aire urbano”. (párrafo inicial)

Román (2025) señala que esta innovación: “...se usó en instalaciones artísticas y arquitectónicas en Venecia y Milán”. (párrafo inicial)



Figura 13. Científicos de ETH Zurich crearon un material vivo que captura y almacena CO_2 eficazmente (Valentina Mori).

De acuerdo con Román (2025), el material desarrollado:

...puede hacer que las paredes de un **edificio ayuden a limpiar el aire que las rodea y a mitigar el problema del cambio climático**. Eso no

es magia: es el resultado de un avance científico real realizado en una **universidad pública de Suiza**.

El nuevo material es capaz de capturar dióxido de carbono (CO₂) de manera eficaz, mientras genera minerales que lo almacenan de forma estable. Los resultados fueron publicados en la revista Nature Communications.

Significa que, además de transformar el CO₂ en biomasa a través de la fotosíntesis, las cianobacterias inducen la formación de minerales y así se consigue un almacenamiento mucho más duradero y seguro del carbono capturado en el propio material.

Consideran que la innovación podría ofrecer una solución escalable y sostenible que elimina el CO₂ de la atmósfera al emplear procesos naturales. (párrafos 1, 35)

Por otro lado, en la fotografía de Christian Fischer (s/f, presentada por Valeria Román, 2025) se comenta que: “Las cianobacterias son organismos microscópicos que contienen clorofila, lo que les permite realizar la fotosíntesis. Están presentes en aguas dulces, saladas, salobres y zonas de mezcla de estuarios”. (pie de fotografía)

2. Respecto al CO₂

Román (2025) nos destaca que:

El CO₂ no es “malo” en sí mismo: las plantas lo necesitan para hacer fotosíntesis. Pero en exceso desequilibra el sistema.

Científicos de todo el mundo **buscan formas efectivas de capturar ese CO₂ para defender la salud del planeta.**

La mayoría de los métodos conocidos hasta ahora son costosos, requieren mucha energía o no consiguen guardar el carbono durante mucho tiempo.

Algunos grupos han probado con técnicas químicas y otros con organismos vivos como plantas y algas.

Pero, hasta este avance, no se había combinado con éxito un material inerte y un organismo vivo que sigue activo dentro del hidrogel y tiene capacidad de almacenar carbono en formas estables. (Cuál es el problema con el CO₂, párrafos 4-8) (La negrita es nuestra).

3. El material

Valeria Román (2025) detalla su fabricación, al explicarnos:

Para fabricar el nuevo material, el equipo usó un hidrogel, que es como una esponja blanda hecha con polímeros. Este gel deja pasar agua, luz y CO₂.

Dentro del hidrogel colocaron millones de cianobacterias, microorganismos que viven en la Tierra desde hace millones de años y pueden hacer fotosíntesis.

Las cianobacterias usan la luz solar para transformar el CO₂ del aire en alimento y oxígeno. También producen una reacción especial: su actividad provoca la formación de minerales sólidos, como la cal, que guarda el CO₂ por mucho tiempo dentro del gel.

El equipo utilizó impresión 3D para dar forma al material y optimizar la entrada de luz, agua y nutrientes. Así crearon piezas y bloques que funcionan bien para proyectos grandes. (Cómo crearon el nuevo material, párrafos 14 y fotografía) (La negrita es nuestra)

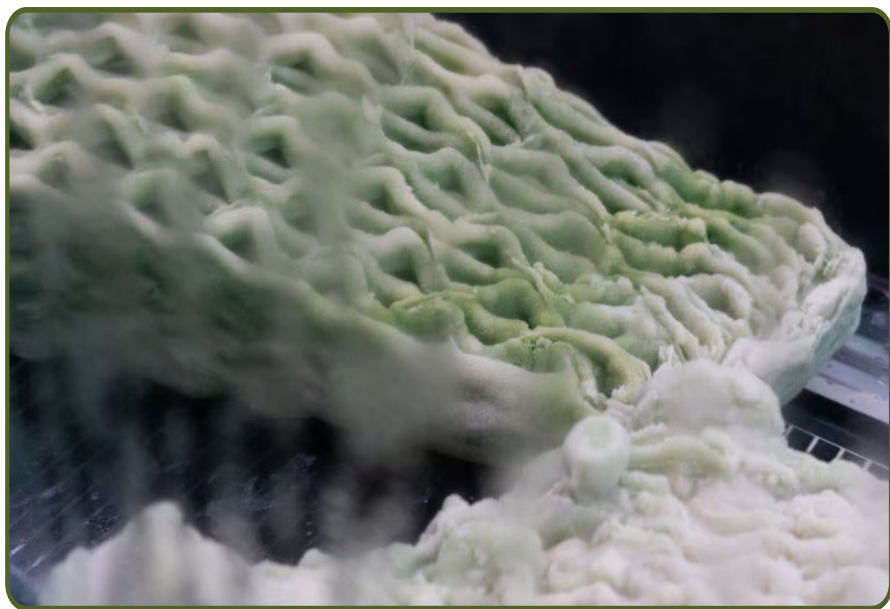


Figura 14. El material combina cianobacterias y un hidrogel con polímero/ Valentina Mori.

Con respecto a los resultados, Román (2025) destaca:

El material logró resultados increíbles: en el laboratorio, pudo atrapar CO₂ de forma constante durante 400 días.

Cada gramo retuvo 26 miligramos de CO₂, y superó a otros métodos como el llamado “hormigón reciclado”. Los minerales que se forman en su interior vuelven el material más fuerte y resistente. (Cómo crearon el nuevo material, párrafos 67) (La negrita es nuestra).

Román (2025) nos explica que: **“Las posibles aplicaciones van más allá de los experimentos. Los investigadores imaginan que el nuevo material se podría usar en edificios, fachadas y objetos urbanos para limpiar el aire y ayudar a combatir el cambio climático”.** (Cómo crearon el nuevo material, párrafo 8) (La negrita es nuestra).

Las experiencias en Venecia y Milán permitieron destacar otras posibles potencialidades del material, así Román (2025) por ejemplo, nos detalla que: “...en la **Trienal de Milán**, cubrieron tejas de madera con el hidrogel y las cianobacterias. Con el tiempo, formaron una “piel” verde sobre la madera, un signo claro de que las bacterias seguían vivas y activas capturando CO₂”. (Las experiencias de Venecia y Milán, párrafo 4) (La negrita es nuestra).

Román (2025) nos comenta que, en un diálogo con INFOBAE la doctora Graciela Salerno, investigadora superior de CONICET en cianobacterias y biotecnología señaló que: “...Se busca desde hace varias décadas en diferentes laboratorios, el desarrollo de métodos de **secuestro de dióxido de carbono** a través de materiales fotosintéticos”. (Las experiencias de Venecia y Milán, párrafo 6) (La negrita es nuestra).

Finalmente, Román (2025) nos comenta que:

Tras leer el estudio publicado en **Nature Communications**, la doctora Salerno, quien no participó en la investigación, opinó que los investigadores de Suiza “le han dado una vuelta interesante y desarrollaron una innovación que combina el poder de las cianobacterias con ingeniería de materiales”.

Además, la científica expresó: “Si bien falta aún escalar la producción y evaluar su implementación práctica, **el hidrogel podría ser una**

estrategia más para combatir al cambio climático. Por supuesto, también se necesita que se reduzcan las emisiones de gases de efecto de invernadero para no seguir agravando el problema”. (Las experiencias de Venecia y Milán, párrafos 78) (La negrita es nuestra).



**HIGUERAS, LA VÍA
OXALATO-CARBONATO
DETALLES DEL
PROCESO BIOQUÍMICO**

Las higueras convierten el CO_2
atmosférico en piedra,
mediante un proceso natural
de mineralización

Las higueras convierten el CO₂ atmosférico en piedra

1. Introducción

Según la publicación de la Asociación Europea de Geoquímica (2025):

Algunas especies de higueras almacenan carbonato de calcio en sus troncos, transformándose (parcialmente) en piedra, según una nueva investigación. El equipo de científicos kenianos, estadounidenses, austriacos y suizos descubrió que los árboles podían absorber dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y almacenarlo como «rocas» de carbonato de calcio en el suelo circundante. (Preámbulo)

Respecto a la investigación se nos detalla que:

La investigación fue presentada en la conferencia Goldschmidt⁹ en Praga. (Preámbulo, párrafo 1).

Los árboles, nativos de Kenia, son uno de los primeros árboles frutales que han demostrado tener esta capacidad, conocida como la vía del oxalato carbonato.

Todos los árboles utilizan la fotosíntesis para convertir el CO₂ en carbono orgánico, que forma su tronco, ramas, raíces y hojas; por eso, plantar árboles se considera un medio potencial para mitigar las emisiones de CO₂.

Algunos árboles también utilizan CO₂ para crear cristales de oxalato de calcio. Cuando partes del árbol se descomponen, estos cristales son convertidos por bacterias u hongos especializados en carbonato de calcio, el mismo mineral que la caliza o la tiza. Esto aumenta el pH del suelo alrededor del árbol, a la vez que aumenta la disponibilidad de ciertos nutrientes.

El carbono inorgánico del carbonato de calcio suele tener una vida útil mucho más larga en el suelo que el carbono orgánico, lo que lo convierte en un método más eficaz de secuestro de CO₂. (párrafos 1-5).

⁹ Conferencia Goldschmidt 2025. Link: <https://conf.goldschmidt.info/goldschmidt/2025/meetingapp.cgi>

2. Su importancia

El responsable del equipo que llevó adelante esta investigación, profesor titular de la Universidad de Zurich (UZH) y ponente de esta investigación destacó lo siguiente:

«Conocemos la vía del oxalato-carbonato desde hace tiempo, pero **no se ha considerado plenamente su potencial para secuestrar carbono**. Si plantamos árboles para la agroforestería y aprovechamos su capacidad para almacenar CO₂ como carbono orgánico al producir alimentos, **podríamos elegir árboles que ofrezcan un beneficio adicional al secuestrar también carbono inorgánico, en forma de carbonato de calcio**».

El equipo, de la UZH, la Universidad Técnica de Nairobi de Kenia, Sadhana Forest, el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, la Universidad de California, Davis, y la Universidad de Neuchatel, estudiaron tres especies de higueras cultivadas en el condado de Samburu, Kenia.

Identificaron a qué distancia del árbol se formaba el carbonato de calcio e identificaron las comunidades microbianas involucradas en el proceso. Mediante análisis de sincrotrón en la Fuente de Luz de Radiación Sincrotrón de Stanford, descubrieron que el carbonato de calcio se formaba tanto en el exterior de los troncos como en las capas más profundas de la madera.

El Dr. Rowley explicó: «A medida que se forma el carbonato de calcio, el suelo que rodea al árbol se vuelve más alcalino. El carbonato de calcio se forma tanto en la superficie del árbol como dentro de las estructuras de la madera, probablemente a medida que los microorganismos descomponen los cristales en la superficie y, además, penetran más profundamente en el árbol. Esto demuestra que el carbono inorgánico se secuestra a mayor profundidad en la madera de lo que pensábamos».



Figura 15. Higuera en África. Mike Rowley

De los tres tipos de higuera estudiados, los científicos **descubrieron que *Ficus wakefieldii* era el más eficaz para secuestrar CO₂ en forma de carbonato de calcio.**

Ahora planean evaluar la idoneidad del árbol para la agroforestería cuantificando sus necesidades de agua y su rendimiento de frutos y haciendo un análisis más detallado de cuánto CO₂ se puede secuestrar en diferentes condiciones.

La mayor parte de la investigación sobre la vía oxalato-carbonato se ha realizado en hábitats tropicales y se ha centrado en árboles que no producen alimentos. El primer árbol identificado con una vía oxalato-carbonato activa fue el iroko (*Milicia excelsa*). **Puede secuestrar una tonelada de carbonato de calcio en el suelo a lo largo de su vida.**

El oxalato de calcio es uno de los biominerales más abundantes y sus cristales son producidos por muchas plantas. Los microorganismos que convierten el oxalato de calcio en carbonato de calcio también están ampliamente distribuidos.

«Es más fácil identificar el carbonato de calcio en ambientes más secos», explicó el Dr. Rowley.

Sin embargo, **incluso en ambientes más húmedos, el carbono aún puede secuestrarse**. Hasta el momento, se han identificado numerosas especies de árboles capaces de formar carbonato de calcio. Pero creemos que hay muchas más. Esto significa que la vía oxalato-carbonato podría representar una oportunidad significativa, aunque poco explorada, para ayudar a mitigar las emisiones de CO₂ al plantar árboles para fines forestales o frutales. (Asociación Europea de Geoquímica, párrafos 6-15) (La negrita es nuestra).

3. Mecanismo vital para mitigar los efectos del Cambio Climático

En el marco de las estrategias para combatir el cambio climático, según nos informa EcoInventos (2025) investigadores han descubierto que: “Integrar árboles biomineralizantes en proyectos de reforestación y agroforestería podría convertirse en una herramienta poderosa dentro de las estrategias globales para combatir el cambio climático”. (párrafo 1)

El artículo nos resume una lista de los principales hallazgos:

- Higuera africana convierte CO₂ en piedra (carbonato cálcico).
- Proceso conocido como **vía oxalato-carbonato**.
- Secuestro **inorgánico de carbono** → más estable y duradero.
- Mejora la calidad del suelo → pH más alto y nutrientes más accesibles.
- *Ficus wakefieldii* = especie más eficaz.
- Potencial para **agroforestería sostenible**.
- Investigación pionera en árboles frutales.

(EcoInventos, 2025, párrafo 2)

Con respecto a cómo opera, EcoInventos (2025) nos lo describe de la siguiente manera:

Este proceso es conocido como la **vía oxalato-carbonato**. Funciona en tres pasos:

1. El árbol absorbe CO₂ mediante la fotosíntesis.
2. Parte de este carbono se transforma en **cristales de oxalato de calcio**.
3. Microorganismos del suelo descomponen estos cristales y los convierten en **carbonato cálcico**, el mismo mineral que forma la tiza y la piedra caliza.

Lo importante es que el **carbono inorgánico almacenado en el carbonato cálcico es mucho más estable** que el carbono orgánico, permaneciendo en el suelo durante siglos. (¿Cómo funciona el proceso?, párrafos 1-3).

Con respecto a sus beneficios, EcoInventos (2025) nos detalla lo siguiente:

Este mecanismo natural tiene múltiples ventajas:

- **Secuestro de carbono a largo plazo**, ayudando a mitigar el cambio climático.
- **Aumento del pH del suelo**, lo que mejora su fertilidad.
- **Liberación de nutrientes esenciales**, que favorece el crecimiento de otras plantas.
- **Producción de alimentos**, ya que las higueras también dan frutos comestibles.

(Beneficios ecológicos y agrícolas, párrafos 1-2).

4. *Ficus wakefieldii*

EcoInventos (2025) nos presenta el caso del *Ficus wakefieldii* y nos presenta los resultados de la investigación:

De las tres especies de higuera estudiadas en el condado de Samburu, en Kenia, la *Ficus wakefieldii* se destacó como la más eficiente en el secuestro de CO₂ como carbonato cálcico.

Los investigadores hallaron depósitos de carbonato tanto **en la corteza** como **dentro de la madera**, lo que indica una absorción más profunda de carbono de lo que se pensaba. (El caso de *Ficus wakefieldii*, párrafos 1-2)

De acuerdo con EcoInventos (2025):

El equipo científico conformado por instituciones de Kenia, EE. UU., Suiza y Austria está ampliando el estudio para:

- Cuantificar la **capacidad total de almacenamiento de CO₂**.
- Medir los **requerimientos hídricos y el rendimiento de fruta**.
- Explorar el uso de estas especies en **sistemas agroforestales sostenibles**.

Hasta ahora, la mayoría de los estudios sobre esta vía se habían centrado en árboles no comestibles. El hecho de que una **especie**

frutal presente esta capacidad abre nuevas posibilidades para la **agricultura regenerativa**.

La vía oxalato-carbonato representa una **solución doble**: captura carbono atmosférico y produce alimentos. Si se identifica y aprovecha esta propiedad en más especies, especialmente en climas tropicales y áridos, se podría:

- **Reducir significativamente las emisiones netas de CO₂.**
- **Regenerar suelos degradados** en zonas afectadas por la desertificación.
- **Incorporar árboles frutales al sistema climático**, sin sacrificar productividad.

Este hallazgo pone sobre la mesa un nuevo tipo de árbol que no solo captura carbono, sino que lo convierte literalmente en piedra. (Investigación en curso, párrafos 1-6)

EcoInventos (2025), nos sugiere, que se puede ampliar la información consultando: ¿Biomining trees turn CO₂ into CaCO₃? Identifying novel oxalate-carbonate pathways associated with East African Fig trees in Samburu County, Kenya. [conf.goldschmidt.info/goldschm ... gapp.cgi/Paper/26094](https://conf.goldschmidt.info/goldschm...gapp.cgi/Paper/26094)

NUESTRAS PROPUESTAS

Para operacionalizar las estrategias y acciones de Mitigación y Adaptación

Son dos los aspectos sobre los que hemos centrado la discusión respecto a la resiliencia de las plantas al cambio climático. En este libro, buscamos poner en evidencia las capacidades y estrategias que las plantas tienen para fortalecer su resiliencia y adaptación a las nuevas condiciones que la emergencia climática nos impone.

■ Propuestas a nivel local

La importancia del tema amerita que se constituya una comisión multisectorial para que en plazo perentorio plantee cursos de acción concretos para sacarle el máximo provecho a los atributos comunicacionales de los vegetales y las estrategias que desarrollan para fortalecer su resiliencia ante condiciones adversas, en especial, aquellos que nos afectan y hacen a la seguridad y suficiencia alimentaria. Por ello sugerimos que:

esta comisión cuente con la asesoría de un equipo técnico en capacidad de coleccionar, estudiar y derivar conclusiones para alimentar la acción, sobre los avances más significativos obtenidos en el aprovechamiento de los sistemas de comunicación de los vegetales y las estrategias que desarrollan para resistirse ante eventos extremos, a fin de disminuir los efectos / consecuencias de mayor impacto debido al Cambio Climático Global, en especial, aquellos que comprometan la alimentación.

Entre los temas relacionados, que debemos abordar se sugieren los siguientes:

aplicación in extenso de la biofertilización, desterrar, en el corto plazo, la aplicación de fertilizantes químicos nitrogenados, lo que implica elaborar un programa con asesoría de expertos de nota, para instalar, en lugares seleccionados, laboratorios de producción de microorganismos que faciliten la biofertilización, entre ellos, las Micorrizas.

■ Propuestas a nivel planetario

- a) **Destinadas a obtener el concurso de entidades, a nivel mundial, en capacidad de obtener consensos de acción conjunta para elaborar y ejecutar un programa destinado a obtener la mayor capacidad de adaptación (resiliencias) de los principales cultivos que hacen a la seguridad alimentaria a nivel planetario.**

En una primera aproximación sugerimos que, las Naciones Unidas proponga la creación de una entidad que congregue a todos los países para que aúnen esfuerzos destinados a aminorar los efectos / consecuencias del Cambio Climático Global, en lo concerniente a obtener cultivos cuyas especies maximicen su capacidad de adaptación (resiliencia) posibilitando que se obtenga seguridad y suficiencia alimentaria a escala planetaria.

Sugerimos que la FAO actúe como secretaría técnica; también que, la entidad responsable de la administración del Banco Mundial de Semillas, asuma la responsabilidad de crear las condiciones para recoger las nuevas colecciones de germoplasma, **fruto de la adaptación a condiciones cambiantes.**

- b) **Razones por las cuales, las nuevas semillas que se conservarán en el Banco Mundial de Semillas - BMS deberán ser aquellas que habiendo continuado los cultivos de los cuales provienen (conservación in situ) mantienen su interacción con el medio ambiente, por lo cual, estarán en capacidad de responder adecuadamente si son sembradas, ante la necesidad de ser repuestas.**

El argumento es que las semillas que se conservan en el BMS fueron mantenidas ex situ, y por ello, dejaron de recibir, como de registrar, con fines de adaptación, los cambios que viene produciendo el Cambio Climático Global - CCG; vale decir, que, si por equis razones deseamos reponerlas a sus lugares de origen, no podrán prosperar.

En concreto, se propone que las semillas que se conserven, en el BMS, se obtengan procesalmente (esto es, en diferentes momentos de la incidencia acrecentada del CCG).

Esto es, cultivos que han sido incentivados a que los vegetales que lo componen, se comuniquen entre ellas, con fines de adaptación a las

condiciones ambientales cambiantes, recurriendo a la biofertilización, el control del pH e inoculación de Micorrizas.

Adicionalmente, dando preferencia a semillas provenientes de cultivos en los cuales se ha procedido a emplear la contribución de sus parientes silvestres, portadores de la herencia genética referente a la capacidad de adaptación, mayores resistencias (rusticidad) ante plagas y enfermedades fungosas, como a la menor disponibilidad de agua e incremento de la temperatura media.

c) Acciones concurrentes a ser activadas

Nos estamos refiriendo a acciones que faciliten la comunicación entre plantas, y la simbiosis, tales como, eliminación de la aplicación de fertilizantes químicos, de pesticidas, tales como: insecticidas, herbicidas y fungicidas; en reemplazo, aplicar biofertilizantes, humus, compost, biochar; el control biológico de plagas, las plantas trampa (usando feromonas que atraen a los insectos), repelentes, etc.

Promover la generación de corredores biológicos para facilitar el desplazamiento de los seres vivos ante el impacto del CCG.

Incentivar, dar mayor aliento, a las investigaciones en curso, destinadas a disminuir la foto transpiración (en el ciclo de Kelvin) en vegetales de valor socio económico.

Crear un sistema mundial, facilitado por la FAO para que en cada país, sobre todo en aquellos designados como mega biodiversos, se generen sistemas de monitoreo y colecta de semillas provenientes de lugares en los cuales se han sido seleccionados para colectar semillas de vegetales que, habiéndose comunicado entre ellos, han producido plantas mejor adaptadas (resilientes) a las nuevas condiciones que impone el Cambio Climático Global; para tal propósito, deberá establecerse la periodicidad en que se efectuaría la colecta, teniendo en cuenta la agresividad del CCG.

Determinar, los tiempos requeridos para efectuar reuniones de verificación, ponderación de resultados obtenidos y de requerimientos de ajustes (feedback, lecciones aprendidas).

La distribución de las semillas (comprende, las sexuales como las asexuales) las cuales han recibido, gracias a la comunicación (simbiosis

de las plantas) mensajes de adaptación. Será tarea de los responsables de las entidades por la ejecución del programa, establecer los criterios que deberán regir la distribución.

d) Nuestras propuestas de acción referidas al Perú

Además de aquellas acciones que siendo de aplicación planetaria, deben ser cumplidas por cada uno de los países, las cuales se mencionan en el aparte: “Nuestras propuestas a nivel planetario”, sugerimos las siguientes:

- La importancia del tema amerita que se constituya una comisión multisectorial para que en plazo perentorio plantee cursos de acción concretos para sacarle el máximo provecho a los atributos comunicacionales de los vegetales, en especial, aquellos que hacen a la seguridad y suficiencia alimentaria.; para ello se sugiere: Cuente, esta comisión con la asesoría de un equipo técnico en capacidad de coleccionar, estudiar y derivar conclusiones sobre los avances más significativos obtenidos en el aprovechamiento de los sistemas de comunicación de los vegetales, a fin de disminuir los efectos / consecuencias de mayor impacto debidos al Cambio Climático Global.
- Entre los temas relacionados, a abordar se sugieren, los siguientes: aplicación in extenso de la biofertilización, desterrar, en el corto plazo, la aplicación de fertilizantes químicos nitrogenados; ello implica elaborar un programa con asesoría de expertos de nota, para instalar en lugares seleccionados laboratorios de producción de microorganismos que hacen a la bio fertilización, entre ellos, las Micorrizas.
- Investigar, los tipos de micorrizas existentes en diferentes ambientes ecológicos a fin de facilitar la inoculación.

Referencias

- Aceitón Cortés, G. (14 de enero de 2024). *Los 'ojos' de las plantas: un estudio revela el mecanismo por el cuál detectan fuentes de luz*. Obtenido de MeteoRed tiempo.com: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/los-ojos-de-las-plantas-un-estudio-revela-el-mecanismo-por-el-cual-detectan-fuentes-de-luz.html#:~:text=Percibir%20de%20d%C3%B3nde%20viene%20la,llamado%20%22canales%20de%20aire%22>.
- Aranda, C. (10 de julio de 2025). *¿Derecho sin poder? Limitaciones estructurales de la Opinión Consultiva OC-32/25 frente a la emergencia climática*. Obtenido de Pressenza International Press Agency: <https://www.pressenza.com/es/2025/07/derecho-sin-poder-limitaciones-estructurales-de-la-opinion-consultiva-oc-32-25-frente-a-la-emergencia-climatica/>
- Asociación Europea de Geoquímica. (12 de julio de 2025). Obtenido de Amigos de la Tierra: <https://noticiasdelatierra.com/las-higueras-convierten-el-co%E2%82%82-atmosferico-en-piedra-segun-reve-la-una-investigacion/>
- Bahamonde, J. (10 de abril de 2025). *Plantas zombi desafían la sequía: investigadores exploran cultivos que podrían “hibernar” en sequías*. Obtenido de Infobae: <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2025/04/10/plantas-zombi-desafian-la-sequia-investigadores-exploran-cultivos-que-podrian-hibernar-en-sequias/>
- Biel, C., Calvet, C., Gurri, A., & Camprubi, A. (7 de Diciembre de 2023). *Menos agua y fertilizantes con el uso de micorrizas en horticultura*. Obtenido de Engormix: https://www.engormix.com/agricultura/gestion-agua-agricultura/menos-agua-fertilizantes-uso_a53467/
- Cáceres De Baldarrago, F., Poma, I., & Spadaro, V. (2012). Evaluación etnobotánica de la Yareta (Azorella compacta) en Arequipa (Perú) y sus posibles aplicaciones. *Quaderni di Botanica ambientale e applicata*, 23, 15-30. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.herbmedit.org/quader-ni/23_015.pdf

- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (19 de Agosto de 2022). *Las Micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica*. doi:<https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Cerdá, A. (22 de noviembre de 2019). *El curioso lenguaje de las plantas*. Obtenido de esporos, la veu del Botanic | Universidad de Valencia. Jardín Botánico: <https://esporos.org/es/es-plantas/el-curioso-lenguaje-de-las-plantas/#:~:text=Lanzar%20mensajes%20al%20aire&text=Estas%20mol%C3%A9culas%20son%20metabolitos%20secundarios,por%20parte%20de%20otras%20especies>.
- ChileBio Noticias. (29 de diciembre de 2024). *Las plantas y los hongos intercambian ‘mensajes moleculares’ para establecer simbiosis beneficiosas*. Obtenido de ChileBio Noticias: <https://chilebio.cl/2024/12/29/las-plantas-y-los-hongos-intercambian-mensajes-moleculares-para-establecer-simbiosis-beneficiosas/>
- CIDH. (3 de julio de 2025). *Opinión Consultiva OC-32/2025 Emergencia Climática y Derechos Humanos*. Obtenido de CIDH - Corte Interamericana de Derechos Humanos: <https://jurisprudencia.corteidh.or.cr/es/vid/1084981967>
- CIDH. (3 de julio de 2025). *Tras el proceso más participativo en su historia, la Corte Interamericana establece el alcance de las obligaciones estatales para proteger los Derechos Humanos ante la Emergencia Climática*. Obtenido de Corte Interamericana de Derechos Humanos (CIDH): chrome-extension://efaidnbmnnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.corteidh.or.cr/docs/comunicados/cp_48_2025.pdf
- CONABIO - Corporación Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (junio de 2025). *Genes. Variabilidad genética*. Obtenido de Biodiversidad mexicana: <https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/vargenetica.html>
- CRAG News. (28 de noviembre de 2024). *Las plantas y los hongos intercambian ‘mensajes moleculares’ para establecer simbiosis beneficiosas*. Obtenido de CRAG News | Centro de Investigación en Agrigenómica: https://www.cragenomica.es/es/crag-news/241128_NdP_SC_IRu-bio-Somoza_NewPhyt_mycorrhizal-symbiosis

- Droppelmann Álvarez, V. (18 de agosto de 2018). *La yareta del altiplano, un tesoro andino*. Obtenido de Ladera Sur: https://laderasur.com/articulo/la-yareta-del-altiplano-un-tesoro-andino/?srsltid=AfmBOor_wPlt-2L1OM7zUnxRVW0HwQNUMLgBC4CXiGZOzyYfPewUFfyrh
- EcoInventos. (9 de julio de 2025). *Investigadores descubren que las higueras convierten el CO₂ atmosférico en piedra, mediante un proceso natural de mineralización*. Obtenido de EcoInventos: [https://ecoinventos.com/investigadores-descubren-que-las-higueras-convierten-el-CO₂-atmosferico-en-piedra/](https://ecoinventos.com/investigadores-descubren-que-las-higueras-convierten-el-CO2-atmosferico-en-piedra/)
- Farrant, J. (diciembre de 2015). *Cómo podemos hacer cultivos que sobrevivan sin agu*. Obtenido de TED Global: https://www.ted.com/talks/jill_farrant_how_we_can_make_crops_survive_without_water/transcript?language=es&subtitle=es
- Gechev, T., Rafe, L., Veselin, P., & Bartels, D. (14 de agosto de 2021). *Biología de sistemas de plantas de resurrección*. Obtenido de NIH | National Library of Medicine: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8558194/#CR1>
- González Tomadin, F. (1 de setiembre de 2024). *La sorprendente capacidad de comunicación de las plantas*. Obtenido de INFOBAE: <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2024/09/01/la-sorprendente-capacidad-de-comunicacion-de-las-plantas/>
- Guilbert, L., & Johnson, D. (2017). *Comunicación entre plantas a través de redes micorrízicas comunes*. doi:<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.09.001>
- Gutiérrez Saldaña, A., Jiménez, A., & Esqueda Valle, M. (26 de enero de 2024). *Los hongos micorrízicos y el “internet de las plantas”*. Obtenido de CONAHCYT | CIAD: <https://www.ciad.mx/los-hongos-micorrizicos-y-el-internet-de-las-plantas/>
- Kil-Ung, K., & Dong-Kyun, S. (2004). *La importancia de la alelopatía en la obtención de nuevos cultivos*. (R. Labrada, Ed.) Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/4/y5031s/y5031s0f.htm#bm15>
- Llosa Larrabure, J. (2023). *Sembrando ideas, Cosechando proyectos. Transitar de una motivación reactiva a una motivación propositiva. Tomo I*. Lima: Jaime Llosa Larrabure.

- Llosa Larrabure, J. (2024). *Sembrando ideas, Cosechando proyectos. Transitiendo de una motivación reactiva a una motivación propositiva. Tomo II*. Lima: Jaime Llosa Larrabure.
- Lomáscolo, S. (6 de diciembre de 2022). *Comunicación a colores: evolución de señales entre plantas y animales*. Obtenido de CONICET: <https://ier.conicet.gov.ar/comunicacion-a-colores/#:~:text=Por%20lo%20tanto%2C%20el%20color,los%20polinizadores%20de%20cada%20ambiente.>
- Loza, R. (30 de abril de 2025). *Científicos japoneses captaron en video el momento inédito en la que 2 plantas 'conversan' para lograr salvarse del peligro*. Obtenido de Diario La República: <https://larepublica.pe/ciencia/2025/04/20/cientificos-japoneses-graban-a-2-plantas-conversando-entre-ellas-para-lograr-salvarse-del-peligro-1950620>
- Megias Pacheco, M., Molist García, P., & Pombal Diego, M. Á. (2 de junio de 2023). *Plasmodesmos*. Obtenido de Atlas de histología animal y vegetal: <https://mmegias.webs.uvigo.es/5-celulas/ampliaciones/3-plasmodesmos.php>
- Química.es. (s/f). *Enciclopedia | Alelopatía*. Obtenido de Química.es: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Alelopat%C3%ADa.html>
- Román, V. (28 de junio de 2025). *Un hidrogel con cianobacterias podría ser una solución para combatir el cambio climático*. Obtenido de infobae: <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2025/06/28/un-hidrogel-con-cianobacterias-podria-ser-una-solucion-para-combatir-el-cambio-climatico/#:~:text=Las%20experiencias%20de%20Venecia%20y%20Mil%C3%A1n&text=En%20la%20Bienal%20de%20Arquitectura,que%2>
- Sacristán, L. M. (28 de agosto de 2021). *¿Qué es el ARN?* Obtenido de SALUTECA: <https://www.saluteca.com/que-es-el-arn/>
- Valle, I. (4 de marzo de 2024). *Así se comunican las plantas: intercambio de moléculas para defenderse o señales eléctricas para el traspaso de nutriente*. Obtenido de 20minutos: <https://www.20minutos.es/noticia/5222473/0/asi-se-comunican-las-plantas-entre-ellas/>

Este libro se terminó de imprimir en los talleres de:
RESEP SRL
Av. Salaverry 243 - Urb. Condevilla - SMP - Lima
resepsrl@yahoo.es

Otros libros de Jaime Llosa Larrabure

ARTEMIA, Aportes para el Desarrollo de la Acuicultura en el Perú (2006)

Cambio Climático en el Perú: aportes para encarar, en un esfuerzo de adaptación algunos de los principales efectos/consecuencias que, por su repercusión demandan atención inmediata. Universidad de San Ignacio de Loyola, Fondo Editorial (2014)

Cambio Climático Global: Una mirada desde nuestro espacio, nuestras esperanzas, nuestras denuncias y propuestas. Universidad de San Ignacio de Loyola, Fondo Editorial (2015).

La pequeña producción agrícola en el Perú: Contribución para superar su condición subordinada al capital. Universidad Nacional Agraria La Molina (2020)

Un socialismo difícil: Armonizar, procesalmente, participación y acumulación en condiciones de escasez. Edición independiente (2022)

Sembrando Ideas, Cosechando Proyectos. Transitar de una Motivación Reactiva a una Motivación Propositiva. Tomo I. Edición independiente (2023)

Proceso de hominización: momentos de afirmación en un querer ser en el nosotros. Edición independiente (2023)

Sembrando Ideas, Cosechando Proyectos. Transitar de una Motivación Reactiva a una Motivación Propositiva. Tomo II. MOCICC (2024)

Breve recuento de los singulares aportes resultantes de la simbiosis de las plantas micorrizadas

He escrito este recuento, con la expresa intención de facilitar, a quien me lea, el atender cabalmente, la enorme importancia de aquello que otorga fundamento a la propuesta que propongo.

- Las hifas de los hongos micorríticos, posibilitan la comunicación de las plantas entre sí; lo hacen con vegetales de la misma especie, como con aquellos de otras especies.
- Cuando una planta es atacada por un herbívoro o una plaga, comunica a las otras plantas, cercanas a su entorno, lo que está ocurriendo, alertándolas para que segreguen alguna sustancia (repelente) que les evite ser atacadas.
- Las plantas hospederas de micorrizas muestran mayor resistencia al estrés, biótico como al abiótico. Asimismo, muestran mayor resistencia a las altas temperaturas.
- Mediante las Hifas, transfieren nutrientes a otras plantas, adicionalmente transfieren mensajes moleculares de ARN (ácido ribonucleico) para silenciar genes específicos que generan rechazo a la aceptación, por las raíces, a ser micorrizadas.
- Mejora los rendimientos de los cultivos al promover un mayor desarrollo radicular, ampliando, con ello, la superficie de absorción de nutrientes; adicionalmente, hace posible que algunos compuestos químicos, como el fósforo, que se encuentran en formas no asimilables, se tornen asimilables.
- Facilita la recuperación de suelos degradados.
- Contribuye a la eliminación de metales pesados cuando estos se encuentran presentes en los suelos.
- Los cultivos micorrizados, son menos exigentes de agua como de fertilizantes